

ІНСТИТУТ КІБЕРНЕТИКИ імені В.М.ГЛУШКОВА
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ХОДАКОВСЬКИЙ МИКОЛА ІВАНОВИЧ

УДК 004.921.4: 621.387

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ПОБУДОВИ ЗАПАМ'ЯТОВУЮЧИХ
ПРИСТРОЇВ З ВИКОРИСТАННЯМ НАНО- І МОЛЕКУЛЯРНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ**

05.27.01 – твердотільна електроніка

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

М.І.Ходаковський

Науковий консультант: Вербицький Володимир Григорович,
доктор технічних наук, професор

Київ- 2019

АНОТАЦІЯ

Ходаковський М.І. Методи та моделі побудови запам'ятовуючих пристроїв з використання нано- і молекулярних технологій. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка.

Інститут кібернетики імені В.М.Глушкова.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Київ, 2019.

В дисертації розв'язано науково-прикладну проблему розробки наукових і технічних основ побудови і практичного використання запам'ятовуючих пристроїв із надвисокою щільністю запису інформації, а саме, на основі мемристорних нано-електронних структур у складі елементів надвеликих інтегральних схем незалежної резистивної пам'яті з довільним доступом та на основі запису інформації на молекулярні носії, зокрема пептидні структури та структури молекулярної електроніки з використанням нуклеїнових кислот. Для цього досліджувалися:

- методи розрахунків режимів обладнання при виготовленні наноструктур із застосуванням зондового окислення та нанолітографії для виготовлення елементів запам'ятовуючих пристроїв із надвисокою щільністю запису інформації;

- параметри та характеристики структур пам'яті з надвисокою щільністю запису інформації з використанням нанотехнологій на основі запам'ятовуючої матриці мемристорних наноелектронних структур, опір яких змінюється при проведенні запису і стирання інформації;

- принципи побудови і характеристики запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації з використанням властивостей оптичної молекулярної нанопам'яті із застосуванням пептидних структур та органічного молекулярного запам'ятовуючого середовища на основі краунвмісного стирилового барвника і молекулярної інженерії фотоперемикаючих молекулярних пристроїв;

- характеристики запам'ятовуючих структур та пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації з використанням молекулярних технологій із застосуванням принципів обробки інформації в нанoeлектронних і молекулярних системах нейронів та їх ядерних компонентах- ДНК і РНК.

В дисертації вперше одержані такі нові наукові результати:

Вперше запропоновані тунельно-зондові технології та вдосконалені методи розрахунків режимів обладнання при виготовленні наноструктур для запам'ятовуючих пристроїв з мінімальними розмірами формованих топологічних елементів і високою точністю їхнього взаємного розташування. Використання скануючого тунельного літографа дозволяє перетворювати дані топології інтегральних схем, отриманих при проектуванні, у топологію шаблону або структурного шару на підкладці.

Вперше створені методи одержання наноструктур запам'ятовуючих пристроїв на основі локального анодного окислення, а саме отримання базових елементів структур пам'яті з використанням різних вістрів атомно-силового літографа та різних величин і тривалості імпульсів напруги при різній відносній вологості, які забезпечують задану продуктивність технологічного процесу.

Запропоновано і реалізовано метод одержання мемристорних нанoeлектронних структур при проведенні запису інформації із застосуванням запам'ятовуючої матриці, елементи якої можуть бути використані при побудові електронних синапсів для нейроморфних чипів.

Вперше запропоновано метод створення запам'ятовуючих структур з надвисокою щільністю запису інформації з використанням молекулярних технологій на основі принципів обробки інформації в полімерних нуклеїнових кислотах в системах нейронів та їх ядерних компонентах- ДНК і РНК. Запропонований метод дозволяє будувати запам'ятовуючі пристрої з можливістю запису та збереження інформації із застосуванням пептидних структур та нуклеїнових кислот.

Запропоновано і підтверджено одержання структур молекулярної пам'яті на основі пептиду бактеріородопсину із досягненням надвисокої щільності запису інформації. Процеси збудження молекулярної структури розділені в часі, що дозволяє повністю виключити фотохімічні процеси поза опроміненого об'єму для забезпечення

обробки інформації з високими ємністю і паралелізмом для оптичної пам'яті в системах обробки зображень, зокрема в системах технічного зору.

Запропоновані і перевірені нові принципи створення запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації з використанням технології побудови оптичної молекулярної нанопам'яті із застосуванням органічного молекулярного запам'ятовуючого середовища на основі краунвмісного стирилового барвника і молекулярної інженерії фотоперемикаючих пристроїв.

Вперше створена модель роботи молекулярної пам'яті з використанням характеристик електропровідності та магнітного поля в рефлексно-сенсорних модулях на поверхні тіла людини та особливостей реєстрації просторової взаємодії термохімічних потенціалів клітини при застосуванні НКВІД-магнітометра. Приведена модель може бути використана при діагностиці стану організму за реєстрацією відхилень від показників норми середньої дорослої людини.

Вдосконалена модель реєстрації молекулярної пам'яті з використанням процесів формування та обробки інформаційного сигналу при взаємодії оптичного випромінювання з молекулярною структурою гемоглобіну та визначені умови локальної реєстрації зміни їх оптичної густини. Вказана модель дає можливість її використання в приладах реєстрації рівня оптичної густини пептидних структур.

Отримані результати мають наступне практичне значення:

Розвинені фізичні та математичні моделі формування наноструктур дозволяють формувати плівки з прецизійно-локалізованих груп атомів за допомогою тунельно-зондових технологій. Запропоновано і реалізовано методику розрахунків режимів обладнання при виготовленні наноструктур для запам'ятовуючих пристроїв з високою точністю їхнього взаємного розташування. Перехід від тунельно-зондових методів індивідуального збирання молекулярних структур до групових за допомогою багатовістревих комплексів дає можливість ефективно використовувати скануючий тунельний літограф.

Запропоновані та практично реалізовані нові методи одержання наноструктур запам'ятовуючих пристроїв на основі локального анодного окислення при різних режимах роботи атомно-силового літографа. Отримані базові елементи структур

пам'яті з використанням різних вістрів атомно-силового літографа та різних величин і тривалості імпульсів напруги при різній відносній вологості. Створено і реалізовано методику формування оксиду при протіканні електрохімічної реакції між зондом і поверхнею зразка у водному середовищі, яка супроводжується процесами електро- і масопереносу іонізованих атомів зразка і гідро- та оксогруп.

Створено і реалізовано запам'ятовуючу матрицю на основі мемристорних наноелектронних структур зі зміною опору при проведенні запису інформації. Запропоновано методику побудови запам'ятовуючої матриці із надвисокою щільністю запису інформації, низькою споживаною потужністю і високою швидкістю роботи на основі кросбарів. Реалізовано поєднання методів локального анодного окислення та методів формування мемристорних наноструктур при одержанні структур резистивної мемристорної нанопам'яті. Вказані методи можуть бути застосовані при реалізації електронних синапсів для нейроморфних чипів.

Запропоновано метод одержання структур молекулярної пам'яті на основі пептидів бактеріородопсину та фітохрому із досягненням надвисокої щільності запису інформації. Створено макетний зразок із застосуванням елементів молекулярної пам'яті на основі пептиду бактеріородопсину для досліджень роботи пептиду родопсину, який відповідає за обробку інформації в очі людини з метою використання в системах технічного зору.

Запропоновано запам'ятовуючий пристрій з надвисокою щільністю запису інформації з використанням технології побудови оптичної молекулярної нанопам'яті із застосуванням органічного молекулярного запам'ятовуючого середовища на основі краунвмісного стирилового барвника і молекулярної інженерії фотоперемікаючих пристроїв. Створена і реалізована методика побудови нанопам'яті з можливістю запам'ятовувати, відтворювати і обробляти інформацію за допомогою світла певної довжини хвилі та властивості молекул разом з іншими молекулами або іонами до самозбирання в мультикомпонентні молекули або супрамолекули.

Створена модель роботи молекулярної пам'яті з використанням характеристик електропровідності та магнітного поля в рефлексно-сенсорних модулях на поверхні тіла людини та особливостей реєстрації просторової взаємодії термохімічних потен-

ціалів клітини при застосуванні НКВІД-магнітометра. Запропонована методика діагностики стану організму за реєстрацією відхилень від показників норми середньої дорослої людини з використанням надчутливої реєстрації магнітного поля серця людини.

Розвинена модель реєстрації молекулярної пам'яті з використанням процесів формування та обробки інформаційного сигналу при взаємодії оптичного випромінювання з молекулярною структурою гемоглобіну та визначені умови локальної реєстрації зміни їх оптичної густини. Запропоновано методики для проведення державної метрологічної атестації приладів для реєстрації рівня оптичної густини пептидних структур із отриманням відповідних свідоцтв.

Створений запам'ятовуючий пристрій з надвисокою щільністю запису інформації з використанням молекулярних технологій на основі обробки інформації в багаточастотних МДН-структурах та полімерних нуклеїнових кислотах. Запропонована методика запису та збереження інформації із застосуванням пептидних структур та з використанням РНК для передачі інформації в ДНК за допомогою спеціального пептиду.

Показано, що використання тунельно-зондових методів як методів індивідуальної обробки може бути виправданим лише в сполученні з методами електронної чи іонної літографії. Одні лише тунельно-зондові методи індивідуальної обробки технологічно не сумісні для обробки площ – 1 мкм^2 і менше, оскільки для висадження на таку площу необхідних атомів зі швидкістю 10^2 ат/с необхідно забезпечити час роботи тунельно-зондового літографа до 100 годин при збереженні відтворених результатів. Навпаки, перехід від тунельно-зондових методів індивідуального збирання молекулярних структур до групових за допомогою багаточастотних комплексів дає можливість використовувати скануючий тунельний літограф досить ефективно.

Створено запам'ятовуючу матрицю на основі реалізації мемристорного ефекту із структурами розмірами в декількох нанометрів та низькою споживаною енергією в одиниці пікоджоулів. Опір мемристора, як двохполюсника змінюється в залежності від загальної величини заряду, що проходить через елемент. Крім цього,

мемристор зберігає свій стан при вимкненні живлення. Програмування наномемристора може виконуватись засобами гібридної схеми, що забезпечує його функціонування в режимах логічного елемента та запам'ятовуючого пристрою. Електричні характеристики мемристора визначаються передісторією його функціонування, що схоже на властивості синапсу біологічних нейронних систем.

Для реєстрації станів молекулярної пам'яті були проведені експерименти з використанням магнітометра на основі надпровідного квантового інтерферометричного датчика для вивчення просторової взаємодії термохімічних потенціалів клітини при роботі молекулярної пам'яті. В даному випадку властивості молекулярної пам'яті використовувались для реєстрації стану рефлексно-сенсорних модулів на поверхні тіла людини. У вказаних модулях інтегрується результат дії багатьох хімічних реакцій ферментних систем, маркером яких є термохімічний потенціал. Сума енергетичного еквіваленту продуктів ферментних реакцій складає сумарну величину термохімічних потенціалів у вигляді енергетичного поля. Прилад поєднує реєстрацію стану молекулярної структури по електропровідності і магнітограмі в досліджуваній ділянці.

Приведені результати із побудови запам'ятовуючих пристроїв на основі мемристорних наноструктур (ReRAM), пам'яті зі зміною фазового стану (PRAM) та пам'яті з використанням нуклеїнових кислот (NAM) підтвердили їх високу актуальність і необхідність для подальшого розвитку мікроелектроніки та інформатики.

Необхідно відмітити також місце та застосування запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації для побудови нейроморфних комп'ютерних платформ. Важливим доробком є реалізація електронного 3D синапсу із перемикаючим опором в межах його зміни на кілька порядків. Процес проходить за рахунок міграції і перебудови кисневих вакансій в середині оксиду. Також важливими результатами є реалізація пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації при зменшенні вартості біта, збільшення швидкості доступу до комірок пам'яті, створення запам'ятовуючого пристрою із застосуванням елементів нуклеїнових кислот, значне зменшення енергоспоживання.

Важливою перевагою застосування нуклеїнових кислот у складі запам'ятовуючого пристрою є наявність у вказаних кислотах програм з керування пам'яттю та щільності запису інформації до десятків петабайт на квадратний дециметр і високий паралелізм обробки інформації, а також використання переваг та особливостей обробки в нейронних системах біосистем.

Реалізовані принципи розробки запам'ятовуючого пристрою з надвисокою щільністю запису інформації на основі синтезу елементів ДНК. В такому пристрої можливо реалізувати синтез ДНК з використанням РНК для передачі інформації від джерела інформації на місце постійного зберігання інформації в ДНК за допомогою спеціального пептиду.

Вдосконалена модель реєстрації молекулярної пам'яті при взаємодії оптичного випромінювання з молекулярною пептидною структурою гемоглобіну. Необхідно відмітити також місце та застосування запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації для побудови нейроморфних комп'ютерних платформ.

Ключові слова: скануючий тунельний літограф, атомно-силовий мікроскоп, тунельно-зондові технології, локальне анодне окислення, мемристорні наноструктури, запам'ятовуючі структури з надвисокою щільністю запису інформації, молекулярний запам'ятовуючий пристрій, запам'ятовуючий пристрій із записом інформації на нуклеїнових кислотах.

SUMMARY

Khodakovskiy M.I. Methods that models of construction memory devices using nano- and molecular technologies. – Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Dissertation for obtaining a scientific degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.27.01 - Solid State Electronics.

V.M.Giushkov Institute of Cybernetics.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute Institute".

Kyiv, 2019.

The scientific and applied problem of development of scientific and technical bases of construction and practical use of storage devices with ultra-high density of recording of information, namely, on the basis of memristor nano-electronic structures consisting of elements of supersize integrated circuits of independent resistive memory with random access and on the basis of recording information on molecular carriers, in particular peptide structures and structures of molecular electronics using nucleic acids. For this purpose:

- methods of calculation of equipment modes in the manufacture of nanostructures with the use of probe oxidation and nanolithography for the manufacture of elements of storage devices with ultra-high density recording information;

- parameters and characteristics of memory structures with super-high density of information recording using nanotechnologies based on the memory matrix of the mimesis nanoelectronic structures, the resistance of which is changed during the recording and erasure of information;

- principles of construction and characterization of storage devices with ultrahigh-density recording of information using the properties of optical molecular nanomemory using peptide structures and organic molecular storage medium based on crown-containing styrene dye and molecular engineering of photoconductive molecular devices;

- characteristics of storage structures and devices with ultrahigh-density recording of information using molecular technologies, using the principles of information processing

in nanoelectronic and molecular systems of neurons and their nuclear components-DNA and RNA.

The following new scientific results have been obtained:

For the first time, proposed tunneling probe technologies and advanced methods of calculation of equipment modes in the manufacture of nanostructures for memory devices with minimal dimensions of molded topological elements and high accuracy of their mutual arrangement. Using the scanning tunnel lithograph allows you to convert the topology data of the integrated circuits obtained during the design, into the topology of the template or the structural layer on the substrate.

The first methods for obtaining nanostructures of storage devices based on local anode oxidation, namely, the acquisition of basic elements of memory structures using different testers of the atomic-power lithograph and various quantities and duration of voltage pulses with different relative humidity, which provide the given productivity of the technological process .

A method for obtaining a memristor nanoelectron structure is proposed and implemented during the recording of information with the use of a memory matrix, whose elements can be used in the construction of electronic synapses for neuromorphic chips.

For the first time, a method for the creation of storage structures with a super-high density of information recording using molecular technologies based on information processing principles in polymeric nucleic acids in systems of neurons and their nuclear components-DNA and RNA has been proposed. The proposed method allows the construction of storage devices with the ability to record and store information using peptide structures and nucleic acids.

The acquisition of molecular memory structures based on the bacteriorhodopsin peptide with the achievement of a super-high density of information recording has been proposed and confirmed. The processes of excitation of the molecular structure are separated in time, which completely excludes photochemical processes outside the irradiated volume to provide processing of information with high capacity and parallelism for optical memory in image processing systems, in particular in systems of technical vision.

New principles of creation of storage devices with super-high density of information recording with the use of technology of optical molecular nanomaterial construction with the use of organic molecular storage medium on the basis of crown-containing styrene dye and molecular engineering of photo-switching devices are proposed and tested.

For the first time a model of the work of molecular memory was created using the characteristics of electric conductivity and magnetic fields in the reflex-sensory modules on the human body surface and the peculiarities of the spatial interaction of the thermo-chemical potential of the cell with the use of a SQUIS magnetometer. The given model can be used at diagnostics of an organism for registration of deviations from indicators of norm of an average adult.

An improved model for registration of molecular memory using the processes of formation and processing of an information signal in the interaction of optical vi-radiation with the molecular structure of hemoglobin and the conditions for the local registration of changes in their optical density are determined. The given model makes it possible to use it in devices for recording the level of optical density of peptide structures.

The obtained results have the following practical value:

The developed physical and mathematical models of the formation of nanostructures allow the formation of films from precision-localized groups of atoms with the help of tunneling probe technologies. The methodology of calculation of equipment regimes in the manufacture of nanostructures for storage devices with high accuracy of their mutual arrangement is proposed and implemented. The transition from tunneling probe methods to the individual assembly of molecular structures into groups by means of multi-strike complexes makes it possible to effectively use a scanning tunnel lithograph.

New methods for obtaining nanostructures of storage devices based on local anode oxidation at different operating modes of the atomic-power lithograph are proposed and practically implemented. The basic elements of memory structures with the use of different testers of the atomic power lithograph and various values and duration of voltage pulses with different relative humidity are obtained. The method of oxide formation during the course of the electrochemical reaction between the probe and the surface of the sample

in an aqueous medium, which is accompanied by the processes of electro- and mass transfer of ionized sample atoms and hydro- and oxo- groups, was developed and implemented.

The memory matrix was created and implemented on the basis of the memristor nanoelectronic structures with resistance change during the recording of information. The method of constructing a memory matrix with super-high density of information recording, low power consumption and high speed of work on the basis of crossbars is proposed. A combination of methods of local anode oxidation and methods of formation of membrane nanostructures is realized in obtaining structures of resistive memristor nanomaterial. These methods can be used for the implementation of electronic synapses for neuromorphic chips.

The method of obtaining molecular memory structures based on peptides bacteriorhodopsin and phytochrome with the achievement of a super-high density of information recording is proposed. A prototype model was developed using molecular memory elements based on bacteriorhodopsin peptide for research on the work of the rhodopsin peptide, which is responsible for processing information in human eyes for use in systems of technical vision.

A storage device with ultrahigh-density recording of information using the technology of optical molecular nano memory construction using an organic molecular storage medium based on crown-containing styrene dye and molecular engineering of photo-switching devices is proposed. The method of constructing nanomaterials with the ability to memorize, reproduce and process information with the help of light of a certain wavelength and properties of molecules, along with other molecules or ions, to self-assemble in a multicomponent molecule or supramolecule is created and implemented.

The model of the work of molecular memory using the characteristics of electric conductivity and magnetic field in the reflex-sensor modules on the human body surface and the peculiarities of the spatial interaction of the thermochemical potential of the cell with the application of a SQUIS magnetometer is created. The method of diagnostics of the organism for registration of deviations from the indicators of the norm of the average adult by using the ultrasensitive registration of the magnetic field of the human heart is proposed.

The developed model of registration of molecular memory using the processes of formation and processing of an information signal in the interaction of optical radiation with the molecular structure of hemoglobin and the conditions of local registration of changes in their optical density are determined. The methods for the state metrological certification of devices for registration of the level of optical density of peptide structures with obtaining the relevant certificates are proposed.

A memory storage device with a super-high density of information recording using molecular technologies based on information processing in multilayer MDS structures and polymeric nucleic acids was created. The proposed method of recording and storing information using peptide structures and using RNA for the transfer of information to DNA using a special peptide.

It is shown that the use of tunneling probe methods as methods of individual processing can be justified only in combination with methods of electronic or ionic lithography. Only tunnel-probe methods of individual processing are technologically incompatible for surface treatment - $1 \mu\text{m}^2$ and less, since for planting such an area of necessary atoms at a rate of 100 atoms /sec, it is necessary to ensure that the tunnel probe lithograph runs for up to 100 hours while maintaining reproducible results. On the contrary, the transition from tunneling probe methods to the individual assembly of molecular structures into groups by means of multi-strike complexes makes it possible to use the scanning tunnel lithograph quite effectively.

A memory matrix was created based on the implementation of a mimic effect with structures in the sizes of several nanometers and low energy consumption per unit of pico joule. The resistance of the memristor, as a two-pole, varies depending on the total value of the charge passing through the element. In addition, the memristor retains its state when power is turned off. Programming of the nanomemristor can be performed by means of a hybrid scheme, which ensures its operation in logical element and storage device modes. The electrical characteristics of the membrane are determined by the background of its functioning, which is similar to the properties of the synapse of biological neural systems.

For the registration of states of molecular memory, experiments were carried out on the use of a magnetometer on the basis of a superconducting quantum interverometric sen-

sor to study the spatial interaction of the thermochemical potentials of the cell in the work of molecular memory. In this case, the properties of molecular memory were used to register the state of reflex-sensory modules on the human body surface. These modules integrate the result of many chemical reactions of enzyme systems, the marker of which is the thermochemical potential. The sum of the energy equivalent of products of enzyme reactions is the total amount of thermochemical potentials in the form of an energy field. The device combines the registration of the state of the molecular structure by electrical conductivity and the magnetogram in the investigated site.

The results of the construction of memory devices based on memristor nanostructures (ReRAM), memory with phase state change (PRAM) and memory using nucleic acids (NAM) have been confirmed by their high relevance and the need for a microelectronics development platform and informatics.

It is also worth noting the place and use of ultra-high density recording media for building neuromorphic computer platforms. An important development is the implementation of an electronic 3D synapse with a switching resistance within its range of several orders. The process is due to the migration and reorganization of oxygen vacancies in the middle of oxide. Also important is the implementation of devices with ultra-high density of recording information when reducing the cost of a bit, increasing the speed of access to memory cells, creating a memory device using elements of nucleic acids, a significant reduction in power consumption.

An important advantage of using nucleic acids in a memorizing device is the availability of memory programs and information recording densities in these acids up to tens of petabytes per square decimetre and the high parallelism of information processing, as well as the use of advantages and features of processing in neural systems biosystems.

The principles of developing a storage device with ultrahigh-density recording of information based on the synthesis of DNA elements have been implemented. In such a device it is possible to realize DNA synthesis using RNA to transfer information from a source of information to a place of permanent storage of information in DNA using a special peptide.

An improved model for registration of molecular memory in the interaction of optical radiation with the molecular peptide structure of hemoglobin. It is also worth noting the place and use of ultra-high density data storage devices to build neuromorphic computing platforms.

Key words: scanning tunnel lithograph, atomic force microscope, tunneling probe technology, local anode oxidation, memristor nanostructures, memory structures with ultra-high density recording information, molecular memory device, memory device with information recording on nucleic acids.

СПИСОК ВИБРАНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

За результатами досліджень опубліковано 90 наукових праць, нижче наведено список основних (вибраних) публікацій автора. Повний список наведений в Додатку до дисертації.

1. Гераїмчук М.Д., Зінченко В.П., Лапінський В.В., Ходаковський М.І., Шут М.І., Гераїмчук І.М., Зінченко С.В., Шевчук Б.М. Інформаційні технології в освіті: засоби та методи.-К.: НТУУ”КПІ”.- 2009.- 88 с.

2. Medvedev I.V., Chechko G.A., Zolotopur A.I., Khodakovskiy M.I. Simulation of silicide layer formation process on silicon in LSI structure taking account of redistribution // Engineering Simulation, 1998.-v.15.-P.377-385.

3. Золотопур А.И., Яворский И.А., Ходаковский Н.И., Климентович В.А. Моделирование процесса формирования наноструктур в проводящих пленках с помощью туннельного сканирующего микроскопа / Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Перспективні засоби обчислювальної техніки та інформатики”, К.-1999.-С.61-68.

4. Ходаковский Н.И., Сытник А.Г. Особенности разработки систем технического зрения для восстановления зрительной функции человека // Управляющие системы и машины, 2000.-№2. –С.35-41.

5. Ходаковский Н.И. Использование молекулярной памяти для сверхплотной записи информации в запоминающих устройствах вычислительной техники / Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України “Нові комп’ютерні засоби, обчислювальні машини та мережі”.-2001,т.1.-С.36-41.

6. Кучеров О.П., Ходаковский Н.И. Розробка оболонки експертної системи для створення електронної книги / Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України “Нові комп’ютерні засоби, обчислювальні машини та мережі”.- 2001,т.1.-С.4-11.

7. Ходаковский Н.И. Этапы развития технологических подходов к созданию молекулярной элементной базы для вычислительной техники / Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Засоби комп’ютерної техніки з віртуальними функціями і нові інформаційні технології”.-К.-2002. - т. 1. -С. 4-9.

8. Ходаковский Н.И. Исследование процессов изготовления элементов молекулярных сенсорных устройств / Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”.-К.-2003.-т.2.-С.134-138.

9. Ходаковский Н.И., Кравченко В.П., Шут Н.И. Разработка обучающей компьютерной системы на основе использования эффекта молекулярной памяти для подготовки авиадиспетчеров / Зб.наук.праць Державної льотної академії України. – Кіровоград. - 2004. -вип. 9. - С.63-71.

10. Ходаковский Н.И. Исследование принципов создания обучающих компьютерных систем на основе эффекта молекулярной памяти и специальных экспертных систем / Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”. - К. - 2004. - № 3. - С.111-116.

11. Тиднюк В.З., Будник Н.Н., Ходаковский Н.И. Разработка приборов для измерения направления и величины энергетических потоков меридианов физиологических систем человека // Управляющие системы и машины, 2005. -№ 3. – С.35-42.

12. Ходаковський М.І. Розробка навчальних комп’ютерних комплексів з використанням принципів когнітивної підтримки в умовах функціонування молекулярної розподіленої пам’яті людини / Зб. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”. - К. - 2005. - № 4. - С.117-122.

13. Тиднюк В.С., Алеев Л.С., Ходаковский Н.И. Полевые взаимодействия и особенности разработки устройств для диагностики и коррекции состояния биологически активных точек // Кибернетика и системный анализ // 2006. -№ 2. - С.157-165.

14. Ходаковський М.І. Використання елементів інформаційних нанотехнологій молекулярних структур пам’яті підсистем природного інтелекту в комп’ютерних навчальних системах / Зб. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”. - К. - 2006. - № 5. - С.125-132.

15. Золот А.І., Ходаковський М.І. Дослідження фізико-технологічних процесів формування наноструктур для створення наноприладів та керування їхніми властивостями // Управляющие системы и машины, 2007. - № 1. – С.48-52.

16. Ходаковский Н.И. Исследование принципов использования и нанотехнологий при создании онтологоуправляемых обучающих систем / Зб. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”. - К. - 2007. - № 6. - С.38-45.

17. Ходаковский Н.И. Исследование информационных нанотехнологий обработки информации для построения систем на основе знаний / Зб. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”. - К. - 2008. - № 7. - С.23-31.

18. Зінченко В.П., Ходаковський М.І., Зінченко С.В., Татулашвілі Т.І. Онтологічний підхід до проектування автоматизованих навчаючих систем / Зб. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”. - К. - 2009. - № 8. - С.113-122.

19. Войтович И.Д., Золот А.И., Ходаковский Н.И. Основные принципы моделирования, проектирования и изготовления медицинских нанороботов // Математичні машини та системи, 2009, №4, С.147-160.

20. Ходаковский Н.И. Исследование систем, основанных на знаниях в подсистемах естественного интеллекта / Зб. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”. - К. - 2010. - № 9. - С.37-46.

21. Войтович И.Д., Золот А.И., Ходаковский Н.И., Мержвинский А.А., Мержвинский П.А. Управление свойствами наноструктур при создании технологических процессов построения наноприборов // Электроника и связь.- 2011, №1.- С.12-14.

22. Н. И. Ходаковский, С. Ю. Ларкин, Г. Г. Галстян. Исследование зондовых методов получения элементов наноэлектронных приборов и технологии диагностики с использованием электростатической силовой микроскопии/ Сб.науч.тр. ин-та металлофизики им.Г.В.Курдюмова НАН Украины "Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии".-2011, т. 9, выпуск 3, С. 535-542.

23. Ходаковский Н.И. Исследование процессов молекулярного кодирования нейронных сетей при обучении / Зб. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”. - К. - 2011. - № 10. - С.30-39.

24. Золот А.И., Ходаковский Н.И., Мержвинский П.А. Використання локального анодного окислення для створення запам’ятовуючих наноприладів // Електроніка і зв’язь.- 2012, №3.- С.14-18.

25. Ходаковский Н.И. Исследование синаптических систем молекулярной памяти и их микропроцессорных свойств при обучении / Зб. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”. - К. - 2012. - № 11. – С.23-32.

26. Ходаковский Н. И., Золот А. И., Мержвинский П. А. Исследование наноструктур при взаимодействии ферментных систем и рефлексно-сенсорных модулей в организме человека// Сб. науч. тр. Ин-тута тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси.- 2013. – С. 120 – 125.

27. Ходаковский Н.И., Золот А.И., Мержвинский П.А. Исследование внешних сигналов макромолекулярного матрикса рефлексно-сенсорных модулей человека магнито- и электрометрическими методами // Зб.наук.пр. Ін-ту металофізики ім.Г.В.Курдюмова НАН України.- 2013.-т.11,№ 4.-С. 701-710.

28. Ходаковский Н.И., Кузьменко Б.В. Моделирование процессов запоминания в нейронных и семантических сетях естественного интеллекта // Управляющие системы и машины.- 2014.-№3.-С.28-32.

29. Ходаковский Н.И., Кузьменко Б.В. Использование ассоциативной распределенной памяти в модели фиксирования знаний //Управляющие системы и машины.- 2015.-№3.-С.59-64.

30. Ходаковский Н.И., Кузьменко Б.В. Исследование модели памяти синаптических структур на принципах работы нейронечетких сетей / Науковий вісник Академії муніципального управління. Сер.Техніка.-Київ.-2015, вип.1(9).-С.219-228.

31. Ходаковский Н.И.,Осинский В.И. Исследование процессов приобретения знаний при формировании памяти под контролем ядра нейрона / Зб. наук. праць Ін-

ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”. - К. - 2015. - № 14. – С.24-31.

32. Ходаковский Н.И., Кузьменко Б.В. Построение автоматной модели обучения в компьютерных обучающих средах //Управляющие системы и машины.- 2016.-№1.- С.45-49.

33. Ходаковский Н.И.,Осинский В.И. Исследование процессов записи информации на ДНК-комплексах нейрона / 36. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”. - К. - 2016. - № 15. – С.86-93.

34. Ходаковский Н.И. Исследование процессов работы молекулярных устройств при формировании памяти в ядре нейрона // Комп’ютерні засоби, мережі та системи.-2017 р.-С.118-125.

35. Ходаковський М.І., Будник М.М., Риженко Т.М., Мержвинський П.А., Мудренко М.І.,Тимошенко Я.М., Грищенко Л.В., Тимофеев Є.П., Расчектаева А.І. Оптичні вимірювання для неінвазивної гемоглобінометрії // Український метрологічний журнал.- 2017.-№4.-С.53-64.

36. Ходаковский Н.И. Метод построения запоминающих устройств со сверхвысокой плотностью записи информации // Кибернетика и системный анализ // 2019. – т.55, № 3. - С.173-181.

37. Патент України UA 77015. Пристрій для контролю формування нанорозмірних структур / Золотопуп А.І., Ходаковський М.І., Ларкін С.Ю., Коржинський Ф.Й., Мержвинський П.А., Шкляр М.П. - опубл. в бюл. № 10, 2006.

38. Патент України UA 80154. Пристрій для виготовлення наноструктур / Золотопуп А.І., Ходаковський М.І., Ларкін С.Ю., Коржинський Ф.Й., Мержвинський П.А. - опубл. в бюл. № 13, 2007.

39. Патент UA №39552. H01 L21/00. Пристрій для виготовлення еталонних структур на основі атомно-силової мікроскопії електростатичних сил / Ходаковський М.І.,Золот А.І., Ларкін С.Ю., Воронько А.О. –Опубл. 25.02.2009, бюл. .№4.

40. Золот А. І., Ходаковський М. І., Мержвинський П.А. Пристрій формування наноелектронних структур. Патент України на корисну модель № 58422.- Бюл. „Промислова власність” №7 від 11.04.2011 р.
41. Ходаковський М. І., Золот А.І., Ларкін С.Ю., Новіков Є.І., Галстян Г.Г. Пристрій зондового анодного окислення наноструктур. Патент України на корисну модель № 62412.- Бюл. „Промислова власність” №16, 2011 р.
42. Золот А.І., Ходаковський М.І. Інтелектуальний біосенсорний пристрій.- Патент України на винахід № 114215.-2017р.- Опубл.10.05.2017.
43. Ходаковський М.І. Запам'ятовуючий пристрій з надвисокою щільністю запису інформації. –Патент України на корисну модель № 124147.- Бюл. „Промислова власність” №6.-2018 р., опубл.26.03.2018 р.
- 44.Ходаковський М.І., Мудренко М.І. Запам'ятовуюча матриця на основі мемристорних наноелектронних структур. –Патент України на корисну модель № 125453.- Бюл. „Промислова власність” №9.-2018 р., опубл.10.05.2018 р.
- 45.Ходаковський М.І., Мудренко М.І. Запам'ятовуючий пристрій на основі оптичної нанопам'яті. –Патент України на корисну модель № 127517.- Бюл. „Промислова власність” №15.-2018 р., опубл.10.08.2018 р.
46. Палагін О.В., Осінський В.І., Золотопуп А.І., Мержвинський А.О., Ходаковський М.І., Осінський О.В. Від гетеролазера до квантового комп'ютера // Праці Міжнар. симпозіуму з питань створення перших ЕОМ “Комп'ютери у Європі: минуле, сучасне і майбутнє”,-К.-1998 -С.437-450.
47. Ходаковський М.І., Золотопуп А.І. Сверхплотная запись информации на основе молекулярных носителей для памяти перспективных ЭВМ // Праці Міжнар. симпозіуму з питань створення перших ЕОМ “Комп'ютери у Європі: минуле, сучасне і майбутнє”,-К.-1998 -С.271-273.
48. Voitovych I.D., Khodakovskiy N.I. Bionic approach to the processes of functioning and planning of the element base of nanorobots / Ukrainian-German Symposium on Physics and Chemistry of Nanostructures and on Nanobiotechnology- Beregove, Crimea, Ukraine. – 6-10 September, 2010.- P.91.

49. I. D. Voitovych, A. I. Zolot, N. I. Khodakovskii, A.A.Merjvinskii, P.A.Merjvinskii. Controlling the properties of nanostructure for creation nanodevices with reproducible characteristics.- XXXI International Scientific Conference “ Electronics and Nanotechnology”.- Kyiv, Ukraine, 12-14 april, 2011.-P. 45.

50. M.I. Khodakovskiy, M.M.Budnyk, V.E.Orel, V.M.Budnyk, I.D.Voitovych. Experimental studying magnetic nanocomplexes with doxorubicin for drug delivery and cancer therapy.- Materials of the Mediterranean-East-Europe Meeting “ Multifunctional nanomaterials (NanoEuroMed 2011”- Uzhgorod, 2011.- P.192-193.

51. Zolot A.I., Khodakovskyy M.I., Merjvinsky P.A. Using of local anodic oxidation in the system substrate-tip of the probe of atomic force lithographer for the creation of storage nanodevices / Proceedings of the XXXII international scientific conference EL-NANO.- “ Electronics and Nanotechnology”.- Kyiv, Ukraine, 10-12 april, 2012.- P. 27-28.

52. Khodakovskyy M. I., Zolot A. I. Investigation of possibilities of using magnetometric devices for diagnosis of reflex sensory subsystems of the human body. International Conference "Parallel and Distributed Computing Systems" PDCS 2013 (Ukraine, Kharkiv, March 13-14, 2013). – P. 360 – 362.

53. Ходаковський М.І. Концептуальні підходи к формированню пам'яті в синаптических системах нейронних мереж / Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції „Обчислювальний інтелект”-(OI-2013), 14-17 травня 2013 р., м..Черкаси, Україна.-С.78-79.

54. Khodakovskiy N.I., Zolot A.I., Merjvinsky P.A. Study of petitem identification processes in highly synaptic productive human / Proc. of Intern. Conf. “Parallel and Distributed Computing Systems”.-PDCS 2014.- Ukraine, Kharkiv, march 4-6, 2014- P.55-57.

55. Ходаковський М.І. Розробка запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації.-Тези доповіді конф., присв.60-річчю Інституту кібернетики ім.В.М.Глушкова НАН України.-11-13 грудня 2017р.-С.235-237.

ЗМІСТ

ВСТУП	31
1. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ НАНОСТРУКТУР ДЛЯ ЗАПАМ'ЯТОВУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ПРИСТРОЇВ	44
1.1. Розробка технологій і методів розрахунків режимів обладнання для виготовлення наноструктур	44
1.2. Вивчення можливостей одержання високопродуктивних методів формування наноструктур	56
1.3. Дослідження напівпровідникових структур на основі GaAs та проведення вимірів за допомогою електростатичної мікроскопії для створення наноструктур з використанням нанолітографа	58
1.4. Використання моделюючих систем в створенні технологічних процесів формування структур для побудови наноприладів	69
1.5. Математичне моделювання нанотехнологічних процесів для створення нанороботів за допомогою програми NanoXplorer	72
1.6. Висновки	76
2. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ЗОНДОВОГО ОКИСЛЕННЯ І ТУНЕЛЬНОГО-ЗОНДОВОГО МАСОПЕРЕНОСУ	78
2.1. Розробка технологічних процесів виготовлення наноструктур на основі методів зондового окислення	78
2.2. Технологія одержання наноструктур шляхом анодного окислення під зондом атомно-силового мікроскопа	80
2.3. Здійснення анодного окислювання на гідрофобній поверхні Si(111) кремнієвим зондом	83
2.4. Моделювання процесу формування наноструктур за допомогою тунельно-зондового масопереносу при переносі атомів металу	90
2.5. Розробка технології нанолітографії для створення нанорозмірних систем запису та зчитування інформації	94

2.6. Дослідження процесів виготовлення наноструктур за допомогою вістрів з мінімальним радіусом кривизни при вершині	97
2.7. Висновки	101
3. ВИКОРИСТАННЯ МЕМРИСТОРНИХ НАНОТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕЗИСТИВНОЇ ПАМ'ЯТІ ReRAM	103
3.1. Особливості незалежної резистивної пам'яті ReRAM на основі мемристорів	103
3.2. Моделювання мемристивності	104
3.3. Вивчення мемристора як двухполюсника з нелінійною вольтамперною характеристикою, що має гістерезис	108
3.4. Використання особливостей роботи мемристора на нанорівні при дії кисневих вакансій	108
3.5. Методи та матеріали для виготовлення мемристорів	110
3.6. Дослідження самовпорядкованих нанотубулярних оксидних шарів	112
3.7. Використання мемристивності при моделюванні нелінійних систем у вигляді синапсів і нейронів	115
3.8. Дослідження процесів резистивного перемикання в сендвіч-структурах Ti / TiO ₂ -HT / Me	121
3.9. Побудова запам'ятовуючої матриці на основі мемристорних наноелектронних структур	123
3.10. Висновки	128
4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА СТВОРЕННЯ ЗРАЗКІВ МОЛЕКУЛЯРНОЇ ПАМ'ЯТІ НА ОСНОВІ ПЕПТИДІВ ТА ФАРБНИКІВ	130
4.1. Дослідження інформаційних моделей молекулярної пам'яті на основі молекулярного зберігання даних	130
4.2. Розробка елементів молекулярної пам'яті на основі пептиду бактеріородопсину	133

4.3. Створення запам'ятовуючого пристрою на основі оптичної нанопам'яті з використанням молекулярних структур фарбників	139
4.4. Реєстрація оптичної нанопам'яті в структурі гемоглобіну	147
4.5. Висновки	149
5. МОДЕЛЮВАННЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ МОЛЕКУЛЯРНОЇ ПАМ'ЯТІ	151
5.1. Дослідження молекулярної пам'яті на моделях синаптичних структур з використанням роботи нейронечітких мереж	151
5.2. Підхід до моделювання пам'яті через навчання знаходження агентом необхідної онтології в осередках пам'яті	155
5.3. Механізми специфічної молекулярної системи пам'яті рецептивних кластерів	156
5.4. Вивчення процесів формування елементів образу	159
5.5. Використання магнітометра на основі надпровідного квантового інтерферометричного датчика (НКВІД) для вивчення просторової взаємодії термохімічних потенціалів клітини при роботі молекулярної пам'яті	163
5.6. Побудова моделі імунної пам'яті для керування комплексом програм підтримки здорового стану людини	170
5.7. Використання автоматного підходу у формуванні запам'ятовуючих структур при навчанні	179
5.8. Утворення асоціативного нейрона при навчанні	185
5.9. Дослідження системоутворюючого фактора як результату моделювання майбутніх подій на нейронах	196
5.10. Дослідження алгоритму програми поведінки шляхом вилучення і переробки інформації	205
5.11. Дослідження механізмів молекулярної пам'яті в природних молекулярних машинах організму людини	214
5.12. Вивчення молекулярних систем в нейроні за наявною	

програмою і молекулярною пам'яттю	216
5.13. Висновки	220
6. МОДЕЛІ І МЕТОДИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ У ЗАПАМ'ЯТОВУЮЧИХ СТРУКТУРАХ НЕЙРОНІВ ТА ЇХ ЯДЕРНИХ КОМПЛЕКСАХ	223
6.1. Аналіз роботи молекулярних структур нейронів на рівні – генні системи –синапси	223
6.2. Подання процесу обчислень для керування нейроном за допомогою молекулярних програм, записаних на ДНК	224
6.3. Модель кодування сигналів в молекулярній структурі нейрона	232
6.4. Інформаційні моделі молекулярних механізмів роботи синапсів	236
6.5. Визначення головного завдання біохімічної машини нейрона по обробці інформації в синаптичних структурах	246
6.6. Моделювання провідності синаптичного контакту при побудові молекулярних запам'ятовуючих структур	248
6.7. Моделювання процесів, що пов'язують пам'ять з генетичними структурами нейрона	256
6.8. Вивчення можливостей програм ДНК в синтезі білків при формуванні молекулярної пам'яті шляхом фіксування подій на молекулярному рівні в синапсах	262
6.9. Дослідження процесів формування запам'ятовуючих структур шляхом прийому електричних сигналів для активації генів в ядрі нейрона	269
6.10. Вивчення процесу передачі сигналів нейронами за допомогою синаптичних мереж	275
6.11. Вивчення ролі нуклеїнових кислот як креслярської документації при синаптичних побудовах молекулярної пам'яті	276
6.12. Дослідження принципів роботи мозку як обчислювального пристрою з паралельною обробкою даних	279
6.13. Розробка запам'ятовуючого пристрою з надвисокою	

щільністю запису інформації на основі синтезу ДНК	285
6.14. Можливості використання молекулярних структур нуклеїнових кислот та пептидів для створення біокомп'ютера	292
6.15. Висновки	295
ВИСНОВКИ	297
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	299
ДОДАТКИ	316
Д1. Список публікацій за темою дисертації	316
Д2. Апробація результатів дисертаційної роботи	329
Д3. Документи про використання результатів дисертаційної роботи	333

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ІМС - інтегральна мікросхема;
НВІС – надвелика інтегральна схема;
КМОН- комплементарна структура метал-окисел- напівпровідник;
КНІ – кремній на ізоляторі;
МОН – метал-окисел-напівпровідник;
МДН- метал-діелектрик- напівпровідник;
НКВІД- надпровідний квантовий інтерферометричний датчик;
ЕОМ –електронна обчислювальна машина;
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;
ЕСМ- електростатична мікроскопія;
СКЗМ- скануюча Кельвін-зонд- мікроскопія ;
СТМ – скануюча тунельна мікроскопія;
СЗМ – скануючий зондовий мікроскоп;
КРП – контактна різниця потенціалів;
АСМ- атомно-силова мікроскопія;
АСЛ- атомно-силовий літограф;
ППП – падіння поверхневого потенціалу;
ВАХ –воль-амперна характеристика;
ЛАО- локальне анодне окислення;
НКНС –напівпровідниковий кристал нитчастої структури;
ІЧ- інфрачервоний;
ІТ- інформаційна технологія;
БР- бактеріородопсин;
ДНК – дезоксирибонуклеїнова кислота;
РНК- рибонуклеїнова кислота;
АТФ- аденозинтрифосфат;
БД- база даних;
БЛМ- біліпідний матрикс;
БР –білок-регулятор;

БМ –білок-модулятор;
БР – бактеріородопсин;
БС – безумовний стимул;
ВО – вхідний образ;
ДП- довготривала пам'ять;
ПНМ- природні нейронні мережі;
ЗП- запам'ятовуючий пристрій;
ШІ – штучний інтелект;
ШНМ –штучні нейронні мережі;
ІРК –іонотропний рецептивний кластер;
КП- короточасна пам'ять;
КН- командний нейрон;
КНД – кластер з нечіткими даними;
МКР- молекулярний квантовий регулятор;
МЗС – молекулярна запам'ятовуюча структура;
МОМ- молекулярна обчислювальна машина;
МК – молекулярний комп'ютер;
МП- методи пошуку;
МРК- мегаботропний рецептивний кластер,
НРГ- безпосередній ранній ген;
НМ – нейрон модулюючий;
НМ- нейронні мережі;
НП- нечіткі правила;
ФІМ – формальна імунна мережа;
ВС – відповідь системи;,
ПЗЗ – прилад із зарядовим зв'язком;
Р- рецептор,
СКБД- система керування базами даних;
СР- сенсорний регістр;
СМ – синаптичні мережі;

СН- сенсорний нейрон;
 ТЛБ- транслокаційний білок;
 ТВ- терабайт;
 КПД- керування потоком даних;
 ПОІ – пристрій обробки інформації;
 ОО –одиничний образ;
 ШНМ –штучні нейронні мережі;
 УС- умовний стимул;
 БС –безумовний стимул;
 СР – сингулярне розкладання;
 ІСК – ієрархічна структура контролю;
 ХКП- хімічний конформаційний перехід;
 ЦГС – циклічні генні системи;
 цАМФ – циклічний аденозинмонофосфат;
 ДМА – державна метрологічна атестація;
 ЕКГ- електрокардіограма;
 RRAM –resistive random access memory- резистивна пам'ять з довільним доступом;
 PCI –peripheral component interconnect –взаємозв'язок периферійних компонентів;
 DDR SDRAM –Double Data Rate Synchronous Dynamic Random Access Memory – синхронна динамічна пам'ять з незалежним доступом;
 analog-to-digital converter- аналого-цифровий перетворювач;
 GTM- Generalized threshold model –узагальнена порогова модель;
 CREB- cyclic response element binding protein- транскрипційний фактор зв'язування білку з окремими ділянками ДНК;
 ICAM- integrated computer aided manufacturing – інтегроване автоматизоване виробництво.

ВСТУП

Актуальність теми. Дисертаційна робота присвячена вирішенню проблеми, пов'язаної з розробкою методів та моделей побудови запам'ятовуючих пристроїв з використанням нано- і молекулярних технологій. В дисертаційній роботі досліджені питання створення запам'ятовуючих пристроїв із надвисокою щільністю запису інформації на основі вказаних технологій. Зокрема представлені результати побудови запам'ятовуючих пристроїв на основі мемристорних наноелектронних структур, запам'ятовуючих пристроїв з використанням молекулярної електроніки з можливістю запам'ятовувати, відтворювати і обробляти інформацію за допомогою світла певної довжини хвилі, а також запам'ятовуючих пристроїв на основі аналізу наноелектронних і молекулярних систем нейрона та його ядерних компонентів -нуклеїнових кислот.

Елементна база нових запам'ятовуючих пристроїв та процесорів повинна мати розміри порядку нанометрів, а це спонукає активно розробляти відповідні напрямки нанотехнологій. Як виявилось, саме в наномасштабних проявах нових фізичних та технологічних досліджень проявляються властивості матеріалів, що дозволяють реалізувати нові підходи до створення запам'ятовуючих та процесорних пристроїв [В.1].

Запам'ятовуючі пристрої та мікропроцесори зараз швидко наближаються до технологічних меж своєї продуктивності. Тому в останні роки йде активний пошук нових напрямків розробок запам'ятовуючих пристроїв та мікропроцесорної техніки, відмінних від домінуючих сьогодні КМОН-технологій. Нова елементна база для вказаних пристроїв повинна мати розміри порядку нанометрів, і, відповідно, рішення для їх створення лежать в області нанотехнологій.

Як вказувалось вище, в наномасштабі проявляються властивості матеріалів, що дозволяють реалізувати нові підходи до створення запам'ятовуючих та процесорних пристроїв. Одним з таких підходів є розробка мемристорів і кросбарів [В.2].

Необхідність побудови запам'ятовуючих пристроїв із надвисокою щільністю запису інформації, а саме, на основі мемристорних наноелектронних структур у складі елементів надвеликих інтегральних схем незалежної резистивної пам'яті з довільним

доступом (RRAM) дозволить значно підвищити швидкодію і знизити споживану потужність обчислювальних пристроїв, які використовують даний вид пам'яті.

Структури, що проявляють мемристорний ефект, мають малі розміри (порядку декількох нанометрів), мають низьку споживану енергію (одиниці пікоджоулів). Опір мемристора, як двухполюсника змінюється в залежності від загальної величини заряду, що проходить через елемент. Крім цього, мемристор зберігає свій стан при вимкненні живлення. Програмування наномемристора може виконуватись засобами гібридної схеми, що забезпечує його функціонування в режимах логічного елемента та запам'ятовуючого пристрою. Електричні характеристики мемристора визначаються передісторією його функціонування, що схоже на властивості синапсу біологічних нейронних систем.

Для створення запам'ятовуючих пристроїв з використанням молекулярної електроніки необхідно налагоджувати виробництво надійних компонентів молекулярних масштабів, здатних запам'ятовувати, відтворювати і обробляти інформацію за допомогою світла певної довжини хвилі.

Однією з фундаментальних властивостей цих молекул повинна бути здатність разом з іншими молекулами або іонами до самозбирання в системи більш високого ступеню складності, в мультикомпонентні молекули, або супрамолекули. Детальна розробка загального підходу до створення і вивчення об'єктів, заснованих на використанні фоточутливих молекул, дозволить вирішити завдання молекулярної інженерії фотоперемикаючих молекулярних пристроїв.

Найбільш підходящим типом реакції, який може забезпечити процес ефективного самозбирання в супрамолекули, представляється комплексоутворення, причому для створення різноманітних і складних супрамолекул вихідні з'єднання повинні бути селективними комплексонами. Перспективними в цьому відношенні серед фоточутливих з'єднань є фотохромні і люмінесцентні сполуки, здатні до зворотних, індукованих світлом, структурних перетворень на основі молекулярного фотоперемикання, зокрема сполуки бактеріородопсину.

Широко відомі роботи з проблем: загальної теорії та питань розробки теоретичних та практичних питань створення нано- і молекулярних технологій для побу-

дови комп'ютерних засобів та систем- І.Д.Войтовича, В.І.Осінського; В.П.Деркача, В.Г.Вербницького, Ю.С.Яковлева, В.К.Неволіна, К.К.Лихарєва, Ч.Пула, Ф.Оуенса, Н.С.Печуркіна, М.Ейгена, В.А.Ратнера, Н.А.Колчанова; методів та засобів побудови запам'ятовуючих пристроїв на основі біокомп'ютингу та імунокомп'ютингу – В.М.Глушкова, Д.Хокінса, В.М.Ахутіна, Л.І.Калакутського, А.П.Немирко, І.А.Кореневського, Є.П.Попечителя, В.П.Широчина; теорії та практичних питань з дослідження молекулярної пам'яті – К.В.Анохіна, І.В.Сергієнка, А.М.Гупала, Д.Еделмана, П.К.Георгієва, І.П.Ашмаріна, А.Р.Лурії, В.А.Молчанова, А.Б.Узденського, Н.П.Бехтерєвої, Т.В.Черніговської.

Дослідження в ряді напрямків нанотехнологій, таких як отримання нових матеріалів, нанорозмірних сенсорів, нанороботів для «адресної доставки» лікарських препаратів вимагають, в свою чергу відповідної інформаційної підтримки у вигляді наноелектронних запам'ятовуючих пристроїв. Всі процеси, що забезпечують життєдіяльність людського організму, відбуваються за рахунок ієрархічно вибудованих процесів передачі інформації. Однією з важливих ланок такої ієрархії є робота молекулярних комплексів клітини -рибосом по синтезу білкових молекул. Усередині клітин за допомогою рибосом постійно здійснюється пересилання «оцифрованих інструкцій» у вигляді матричної або інформаційної РНК, мРНК, відповідно до яких і відбувається формування білків з амінокислот. Ці процеси мають дуже складний характер і здійснюються через створення послідовності так званих конкатенатів - комплексів з топологічно пов'язаних замкнутих молекул ДНК. Сама рибосома є дуже ефективною і надійною «молекулярною машиною» з точки зору нанотехнологій. Ця структура з розмірами 20 нм містить до 10^5 атомів і ініціює процес копіювання та ускладнення біологічних систем. Відповідно до механізму зростання відбувається безперервне зчитування програм генетичного коду, закладеного в ДНК, який за дуже багатьма каналами зворотного зв'язку викликає послідовне укрупнення масштабів зростання, включаючи ріст живих організмів. Таким чином, нанотехнологам надається можливість використовувати коди чужих систем і інформацію, яка міститься в них. Розробники нанотехнологічних систем можуть використовувати такі складні процеси в молекулярній електроніці і нанотехнології.

Аналіз інформаційних процесів в клітині дає нам можливість швидко знаходити нові технічні рішення, користуючись уже створеними природою рецептами і компонентами. При цьому є дуже важливим завдання створення запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації на основі аналізу наноелектронних і молекулярних систем нейрона і його ядерних компонентів-ДНК і РНК. Такі запам'ятовуючі пристрої здатні зберігати інформацію із щільністю до одиниць петабайтів/см².

Розробка технологій та розрахунків режимів обладнання для виготовлення наноструктур з використанням нанолітографії і зондових методів дозволяє створювати елементну базу для запам'ятовуючих пристроїв, зокрема для наномедицини у вигляді наносенсорів, молекулярних сенсорів і нанороботів.

Конкурентоспроможність технології виробництва мікро- і наноструктур інтегральних мікросхем визначається, зокрема, мінімальними розмірами формованих топологічних елементів і точністю їх взаємного розташування. В цьому плані ключовою є технологія перетворення даних топології інтегральних схем, отриманих при проектуванні, в топологію шаблону або структурного шару на підкладці.

В даний час технологія енергонезалежної flash-пам'яті впритул наблизилися до межі масштабування і стикається з серйозними фундаментальними і інженерними труднощами при розмірах менше 10 нм. Дані труднощі визначені самим принципом роботи даного типу пам'яті - реєстрації та перенесення заряду. Внаслідок цього ведуться активні роботи в області розробки мікросхем пам'яті з різними принципами запису і зберігання інформації. Однією з таких технологій є енергонезалежна резистивна пам'ять ReRAM (Resistive Random Access Memory).

В даний роботі автору вдалось створити запам'ятовуючу матрицю на основі мемристорних наноелектронних структур, в якій запам'ятовуючий шар, розташований між двома електродами, дозволяє змінювати опір при проведенні запису і стирання інформації, а також містить мемристорні наноструктури з властивостями нейрона, коли передісторія функціонування мемристорної наноструктури визначає її відповідну реакцію.

Мемристорні наноструктури з властивостями нейрона дозволяють запам'ятовувати та обробляти інформацію, оскільки активність мемристорних наноструктур з властивостями нейрона визначається не тільки типом сигналу, а наявністю короткочасної пам'яті. Останнє дозволяє конкретній мемристорній наноструктурі, що отримувала сигнали в недавньому минулому, значно легше активуватись, що дозволить суттєво розширити функціональні можливості пристрою.

У даній роботі наведені результати досліджень ряду важливих питань проблеми побудови молекулярної пам'яті, а саме, показано шляхи побудови і закономірності її роботи, як на основі молекулярних носіїв типу бактеріородопсину, так і на основі моделей і методів роботи молекулярної пам'яті в біосистемах, зокрема, в організмі людини.

Велика увага приділяється в роботі вивченню і побудови систем, які забезпечують успішне навчання і діагностичну практику за допомогою вивчення ролі ієрархічних структур пам'яті людини на основі молекулярних запам'ятовуючих структур в складі синаптичних і нейронних мереж. Досягнення в технологіях досліджень молекулярної пам'яті дозволяють також досліджувати і розробляти елементну базу молекулярної електроніки.

Досліджуване в роботі поняття молекулярної пам'яті розглядається не тільки як носій інформації, а як важлива ланка в системі обробки інформації при навчанні та діагностиці складних підсистем організму людини. У зв'язку з цим представлені результати по дослідженню вкладу різних ланок, що забезпечують побудову складної ієрархічної структури обробки інформації з використанням різних молекулярних носіїв пам'яті. Такими носіями представляються нуклеїнові кислоти ДНК і РНК, білкові і ферментні комплекси, гліальні структури, структури гіпокампу та ін.

На підставі дослідження інформаційних моделей обробки інформації в мозку можна стверджувати про особливу організацію зберігання інформації в пам'яті людини [В.1]. Розуміння процесів формування знань на основі роботи складних структур пам'яті дозволить створювати високоефективні навчаючі системи.

Зіставлення параметрів і характеристик сучасних комп'ютерів і мозку дозволяє говорити про специфічні методи обробки інформації в мозку людини. Характе-

ристики людського мозку, особливо в частині швидкості обробки інформації, значно поступаються можливостям сучасних ЕОМ. Однак розумові процеси засновані на інших принципах, які ми називаємо творчими, дозволяють більш ефективно, ніж ЕОМ, вирішувати завдання творчого характеру, не дивлячись на малу швидкодію.

Необхідно відзначити, що мозок не вирішує фізичних рівнянь, і не може містити занадто багато зумовлених смислів про зовнішній світ, до якого він не має фізичного доступу [В.2-В.5]. Завдання мозку - передбачити, що буде далі: які будуть відчуття, і які будуть дії. Якщо ці передбачення виявляються правильними, а дії корисними, то така істота в результаті виживає. Здатність мозку до правильного прогнозу зашита в ДНК і передається наступним поколінням.

Мозок може бути представлений як біохімічний процесор. Він підтримує асоціативні процеси в своїй нейронній мережі з метою знаходження минулого досвіду у вигляді цільової функції, а не усвідомлюваної мети. Мозок влаштований так, щоб відтворювати свій вдалий досвід у вигляді асоціативно обумовленої послідовності сигналів в процесі керування виконуючими модулями і підсистемами.

При спостереженні або при обмірковуванні мозок виконує асоціативний пошук. Такий пошук - це просто не дуже точне впізнавання. Неточність викликана порушенням запам'ятовування і тим, що в природі нічого точно не повторюється [В.6-В.13]. В результаті неточного відтворення формуються довші і більш короткі асоціативно пов'язані процеси. Короткі процеси закріплюються в пам'яті завдяки повторенню. Довгі - забуваються, так як їх повторення вимагає часу, якого завжди не вистачає. Більш швидкі аналоги реальних процесів виявляються практично корисними і частіше відтворюються і закріплюються як форми свідомості у вигляді стислих образів.

Мозок, як нейронний процесор, зберігає, обробляє, вводить і виводить нервові сигнали. Всі нервові сигнали є внутрішніми для організму. Коли використовують асоціативний пошук в базі даних, і представляють результат роботи у вигляді виразу на природній мові, то можна говорити, що така система не моделює роботу мозку, а моделює мислення у вигляді логіки і способу міркувань людини [В.14].

Природна нейронна мережа - це лише правильно організоване, захищене від перешкод, стійке до дублювання і розриву зв'язків середовище передачі інформації. Ієрархія знань розміщується не в нейронній мережі, а закодована в інформації, яка по ній циркулює. При надходженні знань ніхто не перекроєє нейронну мережу. Як добре структуровані, так і погано структуровані знання і навички можуть зберігатися в одній і тій же мережі [В.14].

Дуже важливим для процесів вивчення молекулярної пам'яті є властивість мозку не запам'ятовувати видимий образ, оскільки мозок цей образ вже давно запам'ятав у вигляді узагальненого образу. При навчанні структури мозку встановлюють асоціацію між тією докладною картиною, яку бачить око, і тим, як це повинно бути відповідно до життєвого досвіду мозку. Великі ресурси пам'яті використовуються для запам'ятовування того, що відрізняє пропонований образ від типового узагальненого образу.

В роботі представлені результати вивчення функцій ДНК шляхом дослідження процесів запуску ієрархії програм роботи білків. При вивченні роботи схем підтримки процесів обробки інформації на молекулярному рівні значна увага приділялася прояву інтелектуальних функцій нейронів і їх складових - синапсів. В основі роботи зазначених програм лежать дуже важливі властивості білків, як то поява потрібного білка в потрібному місці по складній ієрархії програм. Ряд білків у вигляді каталізаторів забезпечують керування процесами в клітині і допомагають відтворити ДНК, яку можна уявити жорстким диском для запису інформації в клітині.

Проведені дослідження надають можливість використовувати принципи польової взаємодії геномів клітинних структур, як один з одним, так і враховувати керуючий вплив на геном структур, які знаходяться у зовнішньому середовищі. Це дозволяє, в свою чергу, створювати методи енергетичної корекції фізіологічних систем людини за допомогою впливу на певні рефлексно-сенсорні модулі на поверхні тіла людини за схемою: ДНК - імунна система – підсистема, що діагностується.

Здатність людської пам'яті зберігати величезні обсяги інформації пояснюється особливою організацією її зберігання, яка не може бути зведена до механічного запам'ятовування одержуваної ззовні інформації. Ця інформація, будучи інформацією

першого нижчого рівня, служить матеріалом для формування в результаті складних розумових процесів зв'язків і відносин між явищами і предметами у вигляді класифікації, формування образів, понять, створення структурованої інформації другого вищого рівня, тобто знань. Саме на цьому рівні зберігається інформація в пам'яті людини, саме цим пояснюється її великий обсяг і ефективність її використання при дуже скромних можливостях в частині обсягу пам'яті і її швидкодії.

Розробники нанотехнологічних систем можуть використовувати складні процеси, запропоновані в дисертаційній роботі, в молекулярній електроніці і нанотехнологіях. Аналіз інформаційних процесів в клітині дає нам можливість швидко знаходити нові технічні рішення, користуючись уже створеними природою рецептами і компонентами. При цьому є дуже важливим завдання створення запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації на основі аналізу наноелектронних і молекулярних систем нейрона і його ядерних компонентів-ДНК і РНК. Як вказувалось вище, такі запам'ятовуючі пристрої здатні зберігати інформацію із щільністю до одиниць петабайтів/см².

Мета і завдання досліджень. *Мета роботи* - дослідження та розробка нового класу запам'ятовуючих пристроїв із надвисокою щільністю запису інформації на основі методів та моделей побудови запам'ятовуючих структур з використанням нано- і молекулярних технологій.

Для досягнення мети роботи необхідно було виконати такі задачі:

- розробити технології та вдосконалити методи розрахунків режимів обладнання при виготовленні наноструктур із застосуванням методів зондового окислення та методів застосування нанолітографії, що дають можливість розробляти та виготовляти основні елементи запам'ятовуючих пристроїв для наносенсорів та молекулярних сенсорів.

- розробити методи створення пам'яті з надвисокою щільністю запису інформації з використанням нанотехнологій на основі запам'ятовуючої матриці мемристорних наноелектронних структур, опір яких змінюється при проведенні запису і стирання інформації і може бути використаний в побудові нейрона, коли передісторія функціонування мемристорної наноструктури визначає її відповідну реакцію.

- розробити методи створення запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації з використанням властивостей оптичної молекулярної напам'яті із застосуванням органічного молекулярного запам'ятовуючого середовища на основі краєвмісного стирилового барвника і молекулярної інженерії фотоперемикаючих молекулярних пристроїв.

- розробити методи створення запам'ятовуючих структур та пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації з використанням молекулярних технологій із застосуванням принципів обробки інформації в нанoeлектронних і молекулярних системах нейронів та їх ядерних компонентах- ДНК і РНК.

- удосконалити технології побудови молекулярної пам'яті на основі пептидів бактеріородопсину та фітохромів і отримання структур пам'яті на їх основі із значно меншою вартістю і досягненням надвисокої щільності запису інформації;

- удосконалити моделі реєстрації молекулярної пам'яті із використанням взаємодії оптичного випромінювання із структурами пептидів;

- створити модель та дослідити та роботу молекулярної пам'яті на основі вивчення енергетичних характеристик електропровідності і магнітного поля в рефлексно-сенсорних модулях на поверхні тіла людини з використанням особливостей просторової взаємодії термохімічних потенціалів клітини та застосування НКВІД - магнітометра.

Об'єкт досліджень. Запам'ятовуючі пристрої із надвисокою щільністю запису інформації; нанолітографічні технології, запам'ятовуючі матриці на основі мемристорних нанoeлектронних структур; органічне молекулярне запам'ятовуюче середовище; технології побудови молекулярної пам'яті на основі використанням нано- і молекулярних технологій; .

Предмет досліджень. Математичні моделі процесів формування запам'ятовуючих структур із надвисокою щільністю запису інформації; фізико-математичні моделі побудови запам'ятовуючих структур на основі використанням нано- і молекулярних технологій; інженерно-технічні методи розрахунку нанолітографічних процесів; методи побудови запам'ятовуючих структур з використанням мемристорних нанoeлектронних структур та оптичної пам'яті.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до плану наукових досліджень відділу сенсорних пристроїв, систем і технологій безконтактної діагностики Інституту кібернетики ім.В.М.Глушкова НАН України в рамках науково-дослідних тем:

1. „Розробити, дослідити та впровадити методи побудови технічних засобів та інформаційних систем для медичної діагностики на основі нанoeлектронних та молекулярних технологій”-2008-2012 р., № держреєстрації 0108U001240.

2. «Розробка запам'ятовуючих структур для ЕОМ на молекулярних носіях пам'яті» - 1997-2000 р., дог. №2/1249-97 від 11 вересня 1997р., № держреєстрації 0197U000442.

3. « Розробити та впровадити наукові засади формування інтегральних нанорозмірних структур для створення кібернетичних систем розпізнавання образів» - 2003-2007р., № держреєстрації № 0103U000738.

4.“Розробка метрологічного забезпечення та дослідна експлуатація готових до впровадження інтелектуальних сенсорних приладів на основі реєстрації та аналізу магнітних, електричних та оптичних сигналів”- 2012-2016 р., № держреєстрації 0116U002760.

5. "Розробка ефективних зондових методів формування нанoeлектронних структур на основі легованого кремнію"- 2010-2011 р. , № держреєстрації 0110U0011348.

У цих проектах автор був відповідальним виконавцем.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження процесів формування запам'ятовуючих структур із надвисокою щільністю запису інформації; фізико-технічні розрахунки нанолітографічних процесів при виготовленні запам'ятовуючих елементів; створення фізичних моделей роботи мемристорних нанoeлектронних структур та оптичної пам'яті; методи запису та зчитування інформації за допомогою молекулярних носіїв інформації; моделювання процесів збереження інформації в нейроморфних структурах; моделювання запису інформації на молекулярних та наноструктурах; методи досліджень диференційних рівнянь.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розробці нового класу запам'ятовуючих пристроїв із надвисокою щільністю запису інформації на основі методів та моделей побудови запам'ятовуючих структур з використанням нано- і молекулярних технологій. Зокрема представлені результати побудови запам'ятовуючих структур та пристроїв на основі мемристорних наноелектронних структур, запам'ятовуючих пристроїв з використанням молекулярної електроніки з можливістю запам'ятовувати, відтворювати і обробляти інформацію за допомогою світла певної довжини хвилі, а також запам'ятовуючих пристроїв на основі використання властивостей обробки інформації в наноелектронних і молекулярних системах нейрона та його ядерних компонентах- ДНК і РНК. При цьому отримані наступні наукові результати:

- вперше розроблена технологія виготовлення наноструктур для інтегральних схем з мінімальними розмірами формованих топологічних елементів і високою точністю їхнього взаєморозташування за допомогою тунельно-зондових технологій на основі перетворення даних топології інтегральних схем, отриманих при проектуванні, у топологію шаблону або структурного шару на підкладці.

- вперше запропоновано нові методи одержання наноструктур запам'ятовуючих пристроїв на основі локального анодного окислення, а саме отримання базових елементів структур пам'яті з використанням різних вістрів атомносилового літографа та величини і тривалості імпульсів напруги при різній відносній вологості, які забезпечують задану продуктивність.

- вперше запропоновано метод одержання мемристорних наноелектронних структур, опір яких змінюється при проведенні запису інформації з використанням запам'ятовуючих матриць, які можуть бути застосовані в нейроморфних чіпах.

- вдосконалено метод одержання молекулярних структур для забезпечення обробки інформації з високими ємністю, паралелізмом для оптичної пам'яті в системах обробки зображень, зокрема в системах технічного зору.

- вперше створена модель роботи молекулярної пам'яті з використанням характеристик електропровідності та магнітного поля в рефлексно-сенсорних модулях

на поверхні тіла людини при застосуванні надпровідного квантового інтерферометричного магнітометра.

- вдосконалено модель реєстрації молекулярної пам'яті з використанням взаємодії оптичного випромінювання з пептидами та визначені умови локальної реєстрації зміни їх оптичної густини.

- вперше розроблено метод створення запам'ятовуючих структур та пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації з використанням молекулярних технологій на основі принципів обробки інформації в полімерних нуклеїнових кислотах (ДНК та РНК).

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У роботах [2-4,15,21,22,24,37-42,49,51] здобувачем запропоновано і досліджено моделі і методи побудови технологічних процесів формування наноструктур, при цьому були запропоновані методи одержання наноструктур з використанням тунельно-зондових технологій, а також методи та засоби контролю при виготовленні наноструктур. У роботах [9,11,13,26,27,31,33,44-47,52,54] здобувач приймав участь в розробці методів дослідження, виконання експериментальних досліджень, проведення розрахунків, інтерпретації отриманих результатів, їх аналізу та узагальнення технологічних процесів та засобів одержання молекулярної пам'яті. У роботах [19, 48] – здобувач запропонував методи моделювання, проектування та виготовлення медичних нанороботів. У роботах [28-30,32] здобувачем було запропоновано модельні рішення роботи молекулярної пам'яті. У роботах [6,18] здобувач приймав участь у створенні методів інформаційної підтримки роботи запам'ятовуючих пристроїв. У роботах [35,50] здобувач запропонував методи обробки інформації при взаємодії оптичного випромінювання з пептидними структурами та за при використанні наночастинок.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися та обговорювалися на Українських і Міжнародних конференціях, симпозіумах і семінарах (див. список в Додатку в розділі апробації). Опубліковано 18 текстових матеріалів конференцій, список яких наведено в Додатку в розділі публікацій.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані результати покладені в основу створення методів побудови запам'ятовуючих структур та пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації з використанням нано- та молекулярних технологій. Отримані результати створюють основу для подальших розробок запам'ятовуючих пристроїв на нових фізичних принципах, зокрема вже отримано 20 патентів України на винаходи та корисні моделі вказаних структур та пристроїв. Використання отриманих результатів дає можливість розробляти запам'ятовуючі структури та пристрої для перспективної комп'ютерної техніки, зокрема на нано-електронній мемристорній елементній базі та з використанням молекулярної пам'яті. Результати дисертаційної роботи були використані при виконанні вище наведених науково-дослідних проектів в Інституті кібернетики імені В.М.Глушкова НАН України та в дослідженнях в НВО «Фонон», НТУУ «КПІ ім.І.Сікорського», Міжнародного науково-навчального центру Юнеско інформаційних технологій і систем МОН та НАН України, Інституті клітинної біології та генетичної інженерії НАН України.

Сруктура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел з 184 найменувань на 17 стор. Обсяг дисертації становить 311 стор., з 294 сторінок основного тексту, 91 рис. і 10 таблиць.

РОЗДІЛ 1.

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ НАНОСТРУКТУР ДЛЯ ЗАПАМ'ЯТОВУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ПРИСТРОЇВ.

1.1. Розробка технологій і методів розрахунків режимів обладнання для виготовлення наноструктур.

Розробка технологій та розрахунків режимів обладнання для виготовлення наноструктур з використанням нанолітографії і зондових методів дозволяє створювати елементну базу для запам'ятовуючих пристроїв, зокрема для обчислювальної техніки, а також для наномедицини у вигляді наносенсорів, молекулярних сенсорів і нанороботів.

Конкурентоспроможність технології виробництва мікро- і наноструктур інтегральних мікросхем (ІМС) визначається, зокрема, мінімальними розмірами формованих топологічних елементів і точністю їх взаємного розташування. В цьому плані ключовою є технологія перетворення даних топології ІМС, отриманих при проектуванні, в топологію шаблону або структурного шару на підкладці.

Зниження розмірів на перших етапах досягалося застосуванням в генераторах малюнка, як інструменту, впливу на пластину гостросфокусованих лазерних або електронних пучків. При формуванні структури виникають характерні спотворення топології у вигляді зсуву щодо розрахункового положення, зміни масштабу, нелінійності відхилення, обертання і ін. Такі недоліки усувалися відповідними методами корекції. Суттєвого зменшення розмірів вдалося досягти в нанолітографії, в яких топологія шару формується в процесі послідовного переміщення вістря.

Для підвищення точності виготовлення наноструктур важливим фактором є вибір технології перетворення даних топології інтегральних мікросхем, отриманих при проектуванні, у топологію шаблону. Як вказувалось вище, вибір технології виробництва мікро- і наноструктур залежить від можливостей одержання мінімальних розмірів зформованих топологічних елементів. При цьому виникає необхідність перетворення даних топології в проектні норми при формуванні шаблонів на підкладці у вигляді структурного шару [1.1-1.3]. Застосування лазерних або електронних пучків для зниження розмірів через значні відхилення від шаблонів не дозволило досягти

необхідних результатів. При формуванні наноструктур через проявлення відхилень у реалізації топології відносно розрахункового положення були запропоновані відповідні методи корекції [1.4, 1.5]. Ефективне зменшення розмірів при застосуванні нанолітографії дозволяє створювати топологію шару при використанні прецизійних систем «вістря- підкладка».

При цьому вплив на підкладку здійснюється за допомогою технологічних середовищ, які формуються в мікрооб'ємах поблизу вістря (або отворі нанометрового розміру) (рис.1.1.).

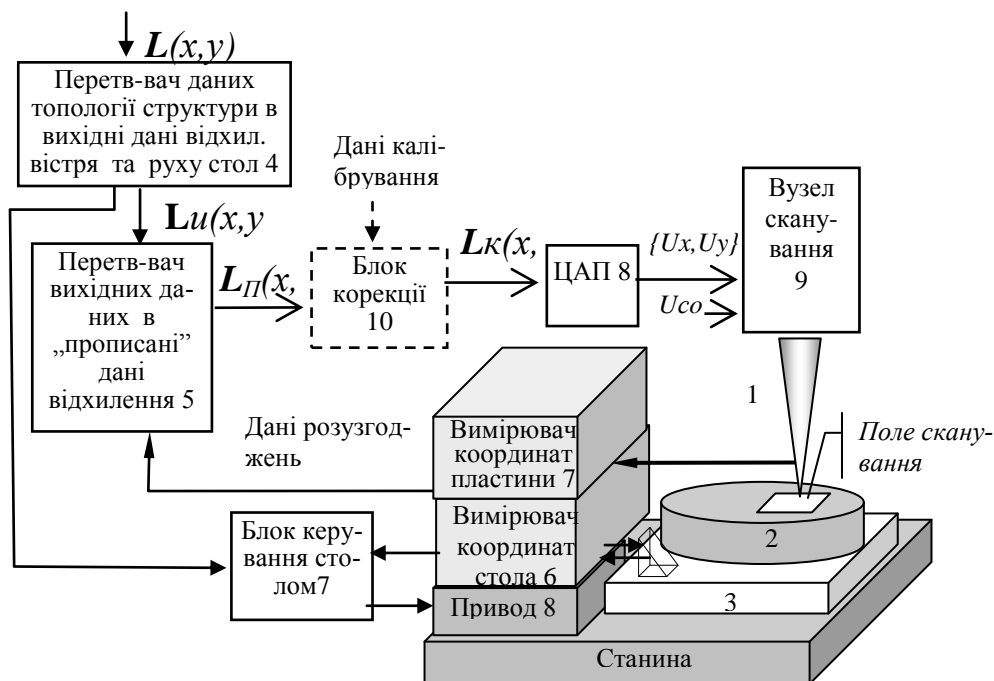


Рис.1.1. Блок-схема формування даних сканування вістря.

Об'єктами технологічного середовища, що впливають на підкладку, можуть бути енергетичний потік (електронів, іонів, фотонів), фізичне поле, а також їх комбінація (в цьому випадку можливе формування нових компонентів, наприклад, агресивного газу) та ін. У ряді випадків скорочення тривалості операції досягається переміщенням інструменту тільки в ті області, в яких потрібно технологічний вплив (так зване векторне сканування).

Перетворення масиву "даних проектування" $L(x, y)$ ІМС (на мові опису топології структури) в «вихідні» дані відхилення $Lu(x, y)$ (координати вістря 1 відно-

сно пластини 2, яка встановлюється на рухомому столі 3), з урахуванням особливостей технологічного процесу, здійснюється перетворювачем 4 (рис.1.1).

Перетворювач 5 здійснює розрахунки неузгодженості між "розрахунковим" і "поточним" положеннями столу 3 і формує «прописані» значення для даних відхилень відповідно до виразу (1.1):

$$\underline{r}_П = \underline{r}_и + \underline{r}_{расс} \quad (1.1)$$

де $\underline{r}_П, \underline{r}_и$ - машинні значення "прописаних" і "вихідних" координат x і y відхилення вістря; $\underline{r}_{расс}$ - машинне значення неузгодженості, вимірюваної блоками 6 і 7. Цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) 8 формують аналогові значення «прописаних» величин відхилення. Вузол сканування 9 зазвичай реалізується на основі п'єзоелектричних приводів, які характеризуються нелінійністю, гистерезисом (відмінністю величини ходу при прямій і зворотній напрузі) і інерційністю. Досягнення необхідної точності позиціонування вістря при наявності цих факторів також може бути досягнуто введенням відповідної корекції даних керування приводом за допомогою програмно- або апаратнореалізованих засобів.

Відомі методи корекції відхилення вістря в скануючих системах мають ряд недоліків, оскільки орієнтовані на електронне сканування і виходять з аналізу траєкторій електронів в електронно-літографічній установці. В роботі запропоновано пристрій для виготовлення наноструктур, блок-схема якого по формуванню даних сканування вістрям приведена на рис.1.1.

Для експлуатації та розробки нових технологічних систем вкрай важливо мати вихідні моделі роботи скануючих систем і визначити загальні методи усунення спотворень, обумовлені як лінійними і кутовими похибками фіксації пластини на рухомому столі, так і особливостями лінійних і нелінійних елементів системи сканування.

Ряд методів корекції відхилення в скануючих системах з орієнтацією на електронне сканування [1.5] стосуються конкретної установки. У випадку загального випадку перекручувань (як лінійних, так і нелінійних) у [1.6] має місце неповний запис наближених значень необхідної величини відхилення.

Необхідність корекції вихідних даних в моделях роботи скануючих систем дозволяє використовувати загальні методи усунення відхилень через лінійні та кутові похибки фіксації пластин на рухомому столі. При цьому дуже важливою є розробка моделі перетворення "прописаних" даних відхилення в поточні дані відхилення з урахуванням корекції спотворень, обумовлених неідеальністю елементів системи сканування (при відмінності характеристик блоку керування від ідеальних).

Одним із способів вирішення є введення блоку 10 корекції даних відхилення для врахування реальних характеристик ЦАП і вузла відхилення. Ці характеристики можуть бути виміряні за допомогою тестових пластин експериментально і записані в блок 10 з метою обчислення машинних значень величини корекції відхилення $\Delta r_{кор}$ при робочому скануванні. Тоді значення відхилення r_k повинні бути сформульовані як (1.2):

$$r_k = r_{II} + \Delta r_{кор}, \quad (1.2)$$

де r_{II} - значення запропонованої величини відхилення.

Згідно розглянутому методу корекції (відповідно до виразу (1.2)), структуру на рис. 1.1 можна спростити, об'єднавши блоки 4 і 5, і представити її у вигляді, як показано на рис.1.2, де 1 – блок формування послідовності прописаних даних відхилення $\{X_{II}, Y_{II}\}$, 2 - блок формування корегованих машинних значень відхилення $\{X_k, Y_k\}$, 3,4 - ЦАП керуючих напруг, які формують послідовність напружень відхилення $\{U_x, U_y\}$, 5 - вузол сканування; 6,7 - вузли зсувів (початкових установок).

Вузол сканування 5 (разом з ЦАП блоку відхилення) забезпечує зміну координат впливу інструменту на оброблюваний об'єкт. При нульовому керуючому сигналі ЦАП координати області сканування визначаються напругою зміщення $U_{см}$ (рис.1.2).

У разі відсутності спотворень у блоках 3, 4 і 5 і ідентичних характеристиках каналів відхилення, зв'язок величини дійсного відхилення $\tilde{r} = \tilde{x} + i\tilde{y}$ вістря і цифрового (машинного) значення $\underline{r} = \underline{x} + i\underline{y}$ на вході блоку сканування може бути описаний як (1.3):

$$\tilde{r} = K_{co} * \underline{r} \quad (1.3)$$

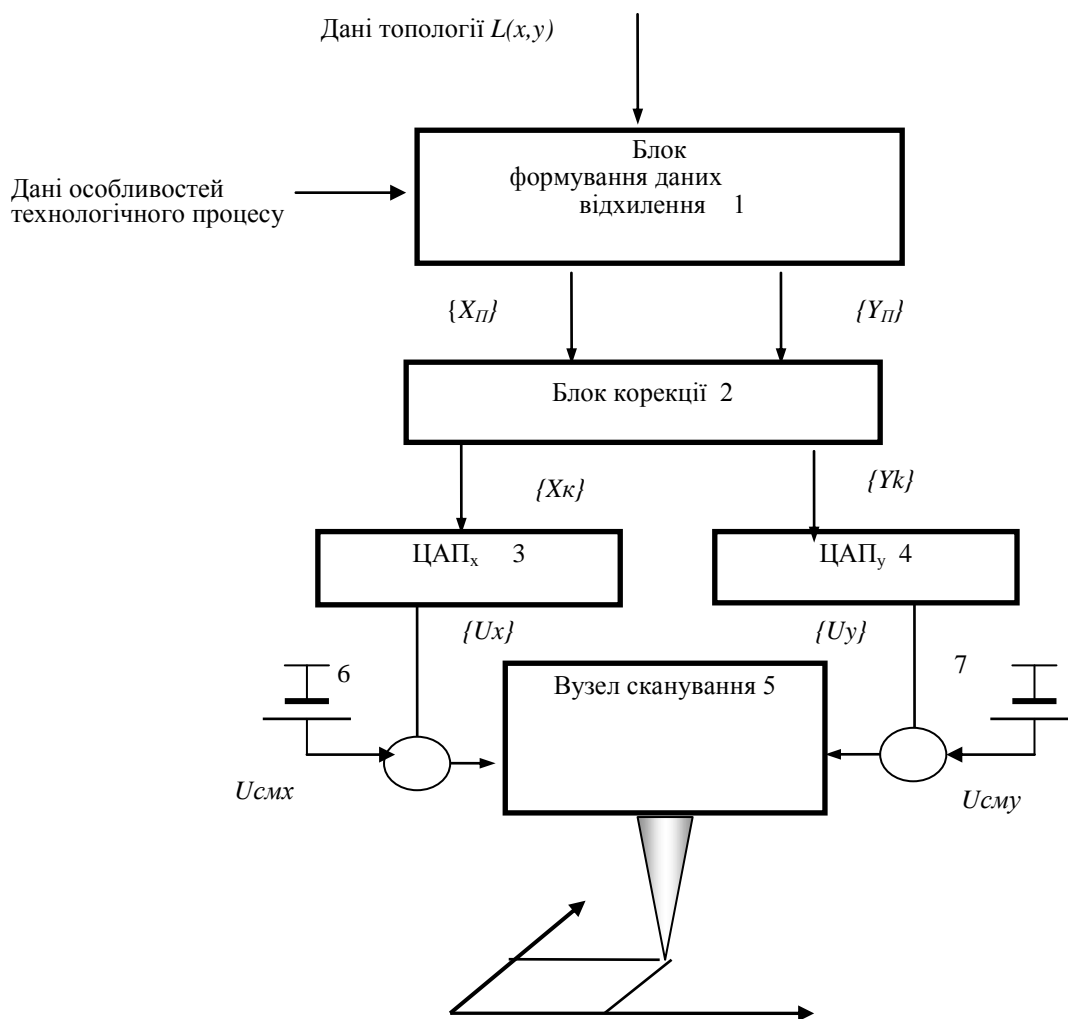


Рис.1.2. Узагальнена структура системи сканування.

де K_{co} - коефіцієнт передачі системи сканування, який дорівнює (1.4):

$$K_{co} = \alpha * K_c \quad (1.4)$$

де α - коефіцієнт передачі ЦАП - каналу, K_c - коефіцієнт передачі вузла сканування. Для нелінійного п'єзоелектричного перетворювача значення коефіцієнта передачі K_c залежить як від вихідного стану підсистеми відхилення, так і від «прописаної» величини відхилення l_{II} .

Розглянемо деякі характерні спотворення для випадків як лінійних, так і нелінійних передавальних характеристик елементів системи сканування, допускаючи, що після операції початкової установки значення K_{co} відомо (або може бути обчислено для деякої обмеженої послідовності відхилень).

Якщо цифроаналогові перетворювачі лінійні, тоді для обчислення напруги можна використовувати вираз (1.5)

$$U_{ax} = a_x * \underline{x}_k, U_{ay} = a_y * \underline{y}_k, \quad (1.5)$$

де a_x, a_y - коефіцієнти передачі ЦАП (блоки 3 й 4); $\underline{x}_k, \underline{y}_k$ - двійковий код на вході ЦАП.

При відомих необхідних машинних значеннях величини відхилення \underline{x} та \underline{y} (отриманих на етапі підготовки даних), у загальному випадку дійсні значення відхилення будуть дорівнювати:

$$x = a\underline{x} + b\underline{y} + l, \quad (1.6)$$

$$y = c\underline{x} + d\underline{y} + m, \quad (1.7)$$

де l й m - погрішності юстування зсуву вістря, a, b, c, d - коефіцієнти передачі відповідних каналів відхилення, a/d - відношення масштабів у напрямках осей X и Y, b/c - характеризує неортогональність відхилення, d/y та c/a - характеризують обертання області сканування. Найпростіші характерні перекручування поля сканування при лінійних елементах вузла відхилення наведені в табл.1. Знайдемо математичні вирази корекції даних для загального випадку.

Таблиця 1.

Математичні моделі характерних перекручувань у вузлі сканування, побудованого на лінійних елементах

Характерні перекручування		Математична модель перекручувань
1	Зсув області сканування зображення	$\tilde{\underline{r}} = \tilde{K} * \underline{r} + \Delta \underline{r}_{см}$, де K - дійсне число, $\Delta \underline{r}_{см}$ - вектор зсуву зображення
2	Поворот області сканування навколо осі координат без зміни масштабу	$\tilde{\underline{r}} = \tilde{K} * \underline{r} = K * e^{j\theta} * \underline{r}$, де $K = a + ib = \sqrt{a^2 + b^2} * e^{i\theta}$, причому $\sqrt{a^2 + b^2} = K, \theta = \arctg b/a$.
3	Зміна масштабу області сканування.	$\tilde{\underline{r}} = \underline{r} + (K + \Delta K) * \underline{r}$, де K - дійсне число
4	Поворот навколо осі з однаковою зміною масштабу у всіх напрямках	$\tilde{\underline{r}} = \hat{K} * \underline{r} = (a + ib) * \underline{r} = \sqrt{a^2 + b^2} * e^{i \arctg b/a} * \underline{r}$, де $\sqrt{a^2 + b^2} = const \neq K$.
5	Різний масштаб області ска-	$\tilde{\underline{r}} = a\underline{x} + ib\underline{y}$, де $a \neq b$ - дійсні числа.

	нування уздовж осі X й осі Y	
6	Неортогональність осей відхилення	$\tilde{r} = a\underline{x} + b\underline{y} + i(c\underline{x} + d\underline{y})$, $b \neq -c$, $ad > bc$
7	Загальний випадок лінійних перекручувань	$\tilde{r} = a\underline{x} + b\underline{y} + l + i(c\underline{x} + d\underline{y} + m)$, $a \neq d$, $b = -c$

Необхідні машинні значення величини відхилення, які повинні подаватися на вхід системи відхилення (без засобів апаратної або програмної корекції) можна отримати, підставивши в рівняння (1.6 та 1.7) $x = \underline{x}_\Pi$ й $y = \underline{y}_\Pi$ одержимо (1.8 та 1.9):

Тоді

$$\underline{x}_\kappa = 1/\Delta * (d * \underline{x}_\Pi - b * \underline{y}_\Pi - d * l + b * m), \quad (1.8)$$

$$\underline{y}_\kappa = 1/\Delta * (-d * \underline{x}_\Pi + a * \underline{y}_\Pi - l * c - a * m), \quad (1.9)$$

де $\Delta = a * d - b * c$; \underline{x}_Π , \underline{y}_Π – «прописані» значення координат вістря, що задаються блоком 1.

Таким чином, запропоновано методи підвищення рівня лінійності для систем сканування за рахунок поліпшення характеристик матеріалів кантилевера (нановістря) на основі карбиду вольфрама.

Значні результати можна отримати в експериментах з кремнієвими, вольфрамовими та з карбиду вольфраму вістрями при роботі на скануючому тунельному літографі з вістрями із радіусом закруглення при вершині 15 нм (рис.1.3 та 1.4).

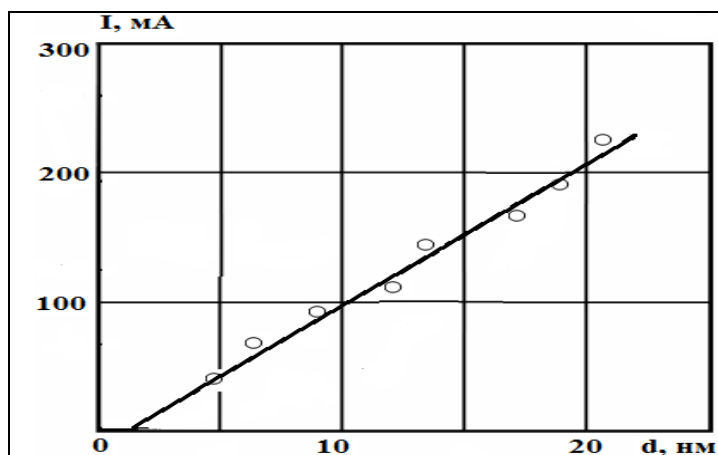


Рис.1.3.Залежність ширини доріжки від величини струму для кремнієвого вістря.

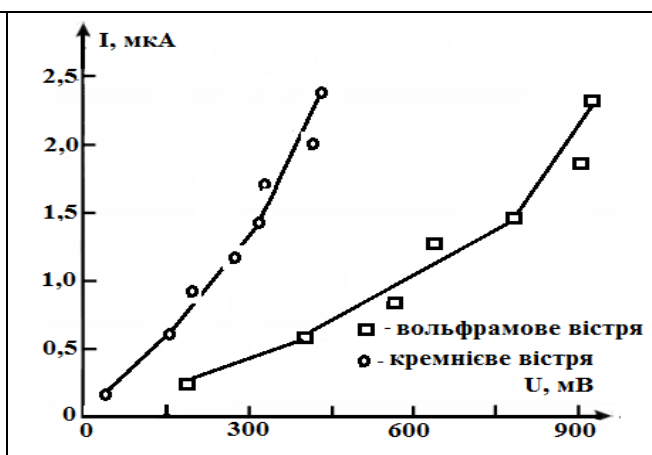


Рис.1.4. Вольт-амперні залежності при отриманні контактних крапок між вольфрамовим вістрям та платиновою підкладкою.

Знайдемо аналітичний вираз для величини корекції даних відхилення для нелінійного блоку сканування (вузли 3, 4 й 5). У цьому випадку блок є нелінійним функціональним перетворювачем, у якому залежність дійсних координат вістря xU і yU від напруг на його вході може бути записана у вигляді нелінійної функції від комплексної змінної U :

$$zU = xU + i yU = F(U) = F_1(Uax + Ucmx, Uay + Ucmu) + i F_2(Uax + Ucmx, Uay + Ucmu), \quad (1.10)$$

де $U = (Uax + Ucmx) + i(Uay + Ucmu) = Ux + iUy$, Uax , Uay - напруги, формовані ЦАП 3 й 4; $Ucmx$, $Ucmu$ - складові входні напруги джерел зсуву 5 й 6.

При нелінійній характеристиці перетворювачів:

$$U_{ax} = \sum_{j=1}^n K_{xj} * \tilde{X}_j * \frac{2^j}{2^{n-1}}, U_{ay} = \sum_{j=1}^n K_{yj} * y * \frac{2^j}{2^{n-1}}, \quad (1.11)$$

де K_{xj}, K_{yj} - коефіцієнти передачі j -го розряду відповідних n -розрядних перетворювачів.

Як і для випадку лінійних елементів, функціонування блоку корекції 2 (рис.1.2) зручно представити у вигляді

$$\underline{x}_k = \underline{x}_\Pi + \underline{\Delta x}_k, y_k = y_\Pi + \underline{\Delta y}_k, \quad (1.12)$$

де \underline{x}_Π, y_Π - запропоновані машинні значення відхилення; $\underline{\Delta x}_k, \underline{\Delta y}_k$ - виправлення, величина яких залежить від нелінійності передаточних характеристик каналів відхилення.

Стосовно до задачі корекції розглянемо загальний, на наш погляд випадок, у якому елементи системи сканування в першому наближенні мають наступні властивості:

1) Цифроаналогові перетворювачі лінійні

$$U_{ax} = a_x * x_k, U_{ay} = a_y * y_k, \quad (1.13)$$

а залежність дійсних координат відхилення \tilde{x} , і \tilde{y} , реалізованих нелінійними каналами вузла відхилення може бути описана як:

$$\begin{aligned}\tilde{x} &= f_1(x_k, y_k) = F_1(a_x * x_k + U_{cmx}, a_y * y_k + U_{cmy}) \\ \tilde{y} &= f_2(x_k, y_k) = F_2(a_x * x_k + U_{cmx}, a_y * y_k + U_{cmy})\end{aligned}\quad (1.14)$$

2) Завдяки постійності характерних параметрів елементів системи й безперервності фізичних процесів будемо вважати, що функція $F(U)$ безперервна.

3) значення коефіцієнтів a_x та a_y у виразі (1.13) після юстування системи відхилення можуть бути встановлені такими, що чутливість каналів відхилення буде однаковою.

Тоді для від'юстованого вузла сканування можна записати наступні співвідношення:

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_k} = \frac{\partial f_2}{\partial y_k}, \quad \frac{\partial f_1}{\partial y_k} = - \frac{\partial f_2}{\partial x_k}\quad (1.15)$$

Вираз (1.15) є умовою диференційованості функції комплексного змінного $f(z_k)$ (умови Коші - Рімана), що здійснює конформне відображення площини Z_k на площину впливу Z , так, що $z = f(z_k)$. Припускаємо що $f(z_k)$ є n - раз безперервно диференційованою, тоді

$$z_k = x_k + i y_k\quad (1.16)$$

Відзначимо, що блок корекції 2 (рис. 1.2) видає дані в межах деякої системи координат X, Y , початок яких визначається початковим положенням вістря в області відхилення. Розкладемо функцію $f(z_k)$ у ряд Тейлора в околиці початку координат:

$$f(z_k) = f(0) + f'(0) * z_k + \frac{f''(0)}{2!} * z_k^2 + \frac{f'''(0)}{3!} * z_k^3 + \dots\quad (1.17)$$

Очевидно, що розкладання (1.17) щодо збіжності повинне бути дійсним лише в області прямокутника, що відповідає полю відхилення. Кількість членів розкладання визначається обраною точністю обчислення величини корекції. Обмежившись трьома членами розкладання й розділивши в (1.17) дійсні та мнимі частини, знаходимо зв'язок між координатними площинами z_k й \tilde{z} :

$$\begin{aligned}\tilde{x} = f_1(x_k, y_k) &= a_1 * x_k + a_2 * y_k + a_3 * x_k^2 + a_4 * y_k^2 + a_5 * y_k * x_k + a_6 * x_k^3 + a_7 * x_k * y_k^2 + a_8 * x_k^2 * y_k + \\ &+ a_9 * y_k^3 \\ \tilde{y} = f_2(x_k, y_k) &= b_1 * x_k + b_2 * y_k + b_3 * x_k^2 + b_4 * y_k^2 + b_5 * y_k * x_k + b_6 * x_k^3 + b_7 * x_k * y_k^2 + b_8 * x_k^2 * y_k + \\ &+ b_9 * y_k^3\end{aligned}\quad (1.18)$$

Значення коефіцієнтів a_1, \dots, a_9 , b_1, \dots, b_9 визначаються при рішенні системи рівнянь (1.18) щодо зазначених невідомих на основі експериментальних даних координат вістря X й Y в області сканування. Ці дані можуть бути отримані скануванням елементів у вузлах деякої сітки, що покриває робоче поле відхилення, і вимірюванням відомими методами дійсних координат елементів за допомогою вістря. Наприклад, скануванням тестових пластин, поверхня яких покрита "мітками", конструкція або матеріал яких має фізичні властивості (опір, коефіцієнт емісії та ін.), відмінними від фізичних властивостей навколишнього середовища. Положення вістря відносно пластини в цьому випадку може бути визначене по положенню імпульсів струму вістря. Підставивши в систему (1.18) запропоновані „прописані” значення x_{II} та y_{II} й вирішивши її відносно x та y , одержимо x_k й y_k .

Розглянемо ітераційний метод, заснований на застосуванні методу Ньютона рішення нелінійних рівнянь. Для зручності запису представимо систему рівнянь (1.18) у векторній формі:

$$\Phi(r) = 0 \quad (1.19)$$

де $\mathbf{r} = \{x_k, y_k\}$; $\Phi(\mathbf{r}) = \{f_1(x_k, y_k) - \tilde{x}, f_2(x_k, y_k) - \tilde{y}\} = \{\Phi_1, \Phi_2\}$.

Тоді наближене значення

$$\mathbf{r}_{n+1} = \mathbf{r}_n - (\Phi'(\mathbf{r}_n))^{-1} * \Phi(\mathbf{r}). \quad (n=1, 2, 3, \dots), \quad (1.20)$$

де як початкове наближення обирається значення $\mathbf{r}_n = \{x_{\Pi}, y_{\Pi}\}$, що подається на вхід блоку 2; його необхідно одержати в площині впливу \mathbf{Z} . При цьому у виразах (1.18) варто покласти $\tilde{x} = x_{\Pi}$, $\tilde{y} = y_{\Pi}$.

Представимо (1.20) у вигляді, зручному для практичного використання з урахуванням, що в реальній підсистемі коефіцієнти підсилення каналів та їхній взаємний вплив можуть відрізнятися. Розкладемо функцію $\Phi(\mathbf{r})$ відповідно до (1.19) у ряд Тейлора в околиці точки $\mathbf{r} = \{x, y\}$:

$$\Phi(\mathbf{r}) = \Phi(x_n, y_n) + \frac{\partial \Phi}{\partial x}(x_n, y_n) * \Delta x + \frac{\partial \Phi}{\partial y}(x_n, y_n) * \Delta y \dots = 0 \quad (1.21)$$

або

$$\begin{aligned} \Phi_1(x_n, y_n) + \frac{\partial \Phi_1}{\partial x}(x_n, y_n) * \Delta x + \frac{\partial \Phi_1}{\partial y}(x_n, y_n) * \Delta y \dots &= 0, \\ \Phi_2(x_n, y_n) + \frac{\partial \Phi_2}{\partial x}(x_n, y_n) * \Delta x + \frac{\partial \Phi_2}{\partial y}(x_n, y_n) * \Delta y \dots &= 0, \end{aligned} \quad (1.22)$$

де $\Delta x = x_{n+1} - x_n$, $\Delta y = y_{n+1} - y_n$.

Вирішивши систему алгебраїчних рівнянь (1.22) відносно Δx й Δy , визначимо

$$x_{n+1} = x_n - D^{-1} \begin{pmatrix} \Phi_1 & \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} \\ \Phi_2 & \frac{\partial \Phi_2}{\partial y} \end{pmatrix} (x_n, y_n) \quad y_{n+1} = y_n - D^{-1} \begin{pmatrix} \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} & \Phi_1 \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} & \Phi_2 \end{pmatrix} (x_n, y_n) \quad (1.23)$$

$$\text{де} \quad D = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} * \frac{\partial \Phi_2}{\partial y} - \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} * \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \\ \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} & \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} & \frac{\partial \Phi_2}{\partial y} \end{bmatrix} (x_n, y_n).$$

За допомогою ітераційного співвідношення (1.23) наближені значення коренів (1.18) у блоці корекції 2 можуть бути визначені із заздалегідь заданою точністю. Отримані значення коренів $x_k = x_{\Pi} + \Delta x_k$ й $y_k = y_{\Pi} + \Delta y_k$, перетворюються потім у відповідні керуючі напруги U_x й U_y , які подаються на вхід системи відхилення.

Для ілюстрації співвідношень розглянемо чисельний приклад. Нехай для деякої системи сканування, описуваній як

$$\Phi(x,y) = ax + by + cx^2 + dx^3 + i(ex + fy + gy^2) \quad (1.24).$$

при калібруванні підсистеми відхилення знайдено, що $a=1$; $b=0,2$; $c=-0,03$; $d=0,001$; $e=-0,2$; $f=1$; $g=0,02$. Тоді для заданих величин відхилення $x=0,6$ й $y=0,7$ значення $\Phi(x,y)$ будуть:

$\Phi_1(0,6;0,7) = 0,151016$; $\Phi_2(0,6;0,7) = -0,1102$. Після першої ітерації $x_{n+1} = 0,443$; $y_{n+1} = 0,788$. При використанні отриманих значень у якості x_k, y_k відхилення вістря складе:

$$f_1(x_k, y_k) = 0,6 \text{ й } f_2(x_k, y_k) = cx + dy = 0,7. \quad (1.25)$$

У результаті вістря з погрішністю, обумовленою точністю розкладання й обчислень, попадає в крапку з координатами $\tilde{x} = x_{\Pi}$, $\tilde{y} = y_{\Pi}$.

Таким чином запропоновані моделі обчислень величини відхилення для підвищення точності сканування враховують особливості передаточних характеристик блоку сканування. Програмно реалізований механізм корекції на основі ітераційного методу Ньютона. Запропоновані моделі обчислень величини відхилення робочого органу для підвищення точності сканування універсальні. Конкретні способи корекції, залежно від особливостей вимог до швидкодії і технічних рішень основних вузлів, можуть бути реалізовані як програмними, так й апаратними засобами.

З розглянутої структурної моделі системи сканування впливають наступні методи вдосконалювання систем сканування: 1) Підвищення лінійності системи сканування за рахунок поліпшення характеристик матеріалів, з яких виготовлені приводи відхилення вістря (перетворювачів «сигнал» - «переміщення»).

2) Застосування нелінійних цифроаналогових перетворювачів, за допомогою яких можна компенсувати нелінійність, обумовлену третім і шостим членами розкладання.

3) Введення електричних зв'язків між цифроаналоговими перетворювачами 3 й 4 і функціональних перетворювачів для компенсації нелінійності, обумовленої іншими членами розкладання. Вимоги до швидкодії функціональних перетворювачів визначаються припустимим часом переміщення вістря, який може знаходитись в діапазоні десятків - сотень наносекунд для високопродуктивних систем.

4) Корекція даних відхилення. Одержати аналітичне рішення рівнянь (1.18) не є можливим. Величини X_k й Y_k можуть бути визначені наступними методами:

а) методом апроксимації тим або іншим способом експериментально обмірюваної зворотної функції й формуванням x_k, y_k за допомогою функціонального перетворювача;

б) чисельними методами на основі розглянутого вище ітераційного методу.

1.2. Вивчення можливостей одержання високопродуктивних методів формування наноструктур.

В загальному вигляді роботу пристрою керування багатовістревим катодом можна представити наступним чином (рис.1.5).

1. Початкові дані керування процесом знаходяться на ПК.

2. В залежності від завдання дані керування завантажуються у відповідний модуль для кожного заданого вістря. Кожний модуль має незалежне керування своїм каналом.

3. При роботі окремий модуль взаємодіє з внутрішньою пам'яттю та пристроями цифро-аналогового перетворювання, при цьому швидкість видачі даних і команд керування на виконуючі пристрої є максимальною. Виведення даних здійснюється по каналам, які забезпечують неперервність технологічних операцій.

4. По закінченні технологічного завдання процесорний модуль встановлює відповідний сигнал на програмний монітор ПК. В процесі роботи за допомогою монітору ПК відтворюється корекція в режимі роботи довільного модуля для заданого каналу.

У якості керуючих елементів використовуються плати паралельного введення/виведення на основі сигнальних процесорів Texas Instrument TMS 6416. Плати керування встановлюються в PCI слоти Хост-ПК. Розпаралелювання роботи здійснюється завдяки наявності кількох плат з одночасним виведенням даних керування по кожному каналу окремим процесором.

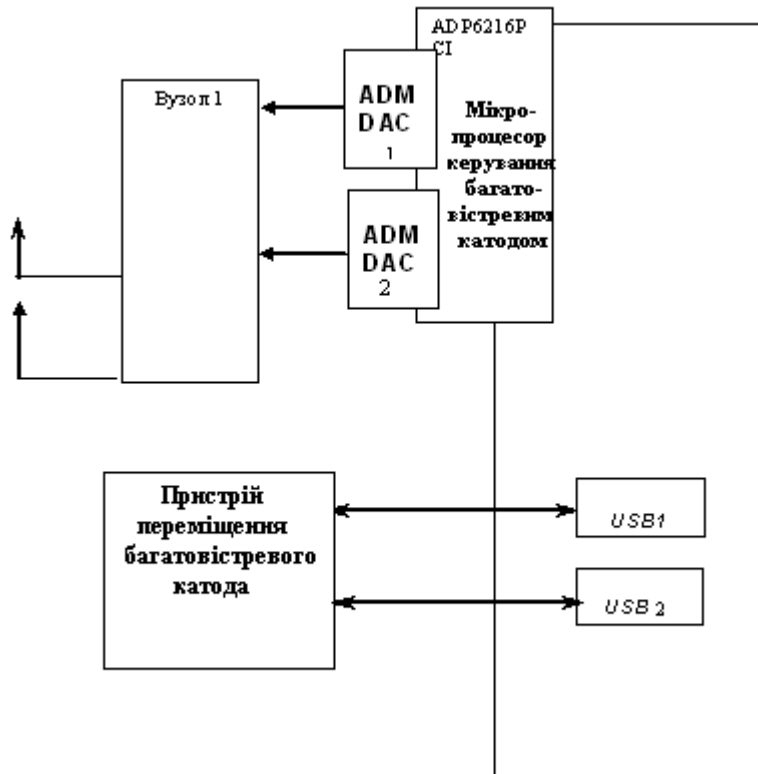


Рис.1.5. Пристрій підготовки й обробки даних для керування багатівістрєвим катодом.

Функціонально пристрій виконаний на базі робочої станції Хост=ПК наступної конфігурації: Intel PVI 2.5 GHz, 1 GB RAM, 200 GB HDD.

Мікропроцесорний модуль на базі TMS5501 керує трьома цифро-аналоговими перетворювачами, виходи яких зв'язані з входом вузла біморфних п'єзоманіпуляторів, які забезпечують керування вістрям по X,Y,Z координатам.

З мікропроцесорного вузла типу TMS6416PCI здійснюється керування багатівістрєвим катодом зі швидкодією 5760 MIPS на частоті 720 МГц.

Вихідні цифро-аналогові перетворювачі мають наступні характеристики: Два синхронні канали ЦАП AD9772 14 розрядів; початкова напруга ЦАП ± 1.0 В;

$R_{\text{поч}}=50 \text{ Ом}$; пристрій програмування частоти дискретизації ЦАП до 100 МГц; буферна пам'ять FIFO ЦАП до 256К слів на канал.

Системний інтерфейс із Хост-ПК PCI64/66, швидкість передачі даних до 250 МБ/с з можливістю сумісної синхронної або незалежної роботи кількох модулів. Буферна пам'ять тракту введення/виведення DDR SDRAM ємністю 2 або 4 ГБ. Сумарний потік даних може складати до 800 Мбайт/с на один канал введення-виведення. Корекція в режимі роботи довільного модуля може вводитись для заданного каналу.

1.3. Дослідження напівпровідникових структур на основі GaAs та проведення вимірів за допомогою електростатичної мікроскопії (ЕСМ) для створення наноструктур з використанням нанолітографа.

Точність скануючої зондової мікроскопії (СЗМ) - базового методу нанотехнології при дослідженні топографічних особливостей рел'єфу визначається калібруванням сканера в XYZ напрямках і формою вістря зонда. Процес калібрування СЗМ вимірів рел'єфу, а також тестування форми зонда досягається шляхом визначення граничної латеральної роздільної здатності при використанні еталонів добре орієнтованого піролітичного графіту та підкладки слюди.

В цьому розділі наведені результати експериментальних досліджень вимірювання розподілу зарядів і потенціалів в електростатичній мікроскопії (ЕСМ) з використанням зразків еталонів з гладким на нанометровому рівні топографічним рел'єфом. Були отримані різкі границі в рел'єфі потенціалу з незмінними амплітудами, що не залежали від вимог до вимірів. Застосування напівпровідникових структур на основі GaAs з різким p-n переходом для проведення вимірів у ЕСМ дає змогу створювати наноструктури шляхом використання нанолітографа [1.7]. Еталонні зразки з різким p-n переходом можуть застосовуватися для калібрування вимірів в скануючій Кельвін зонд мікроскопії (СКЗМ) при подачі каліброваного зсуву на замикаючий перехід. При цьому для обчислення інструментальної функції СКЗМ досить продиференціювати профіль усередненого й нормалізованого сигналу падіння поверхневого потенціалу.

Значна інформативність вимірювань розподілів зарядів і потенціалів за допомогою електростатичної силової мікроскопії (ЕСМ) і скануючої Кельвін зонд мікроскопії (СКЗМ) не може бути використана в повній мірі, оскільки відповідні еталони калібруються без використання промислових стандартів. Пов'язано це з певними труднощами при створенні стабільних еталонів для ЕСМ і СКЗМ. В ЕСМ мікроскопії переміщення зондів щодо поверхні зразка здійснюється керамічними сканерами за рахунок зміни їхніх лінійних розмірів і створення бічних вигинів при додаванні до їх обкладок електричної напруги. На жаль, ці зміни відбуваються з полем не лінійно. Тому потрібне окреме калібрування зондів для кожного можливого діапазону виконуваних вимірів від мікронів до нанометрів.

Необхідність створення еталонних структур для визначення точності переміщень сканера особливо актуальна у важливому діапазоні - одиниць нанометрів. У цьому діапазоні пропонується, фактично, одна еталонна структура – структурована атомними шаблями поверхня кристалів Si(111) с висотою окремих шаблів 0.314 нм. Така висота наближається до z-значення шуму атомно-силового мікроскопа на рівні 0.1 нм, що обмежує застосування згаданого еталону. З метою калібрування більш зручними представляються шаблі висотою 1 нм або трохи більшими. Наші дослідження виявили, що тестові структури з такою висотою шаблів можуть бути реалізовані на базі слабко розорієнтованих поверхонь кристалів 6H-SiC (0001), що мають значення параметра постійної решітки в напрямку перпендикулярно поверхні 1.5 нм. При термічному травленні поверхонь 6H-SiC (0001) в атмосфері водню або парів HCl на них можуть отримуватися ешелони сходинок висотою в одну сталу решітки.

Застосування таких поверхонь для калібрування нанопереміщень раніше не обговорювалося. У даній роботі були розглянуті можливості таких застосувань, а також використання країв атомних сходинок для оцінки гостроти закінчень ЕСМ зондів. Як об'єкти досліджень використовувалися структуровані поверхні 6H-SiC, приготовлені методом термодеструктивного прогріву Si-поверхні зразків 6H-SiC (1000) до 1400 °C. У цьому випадку відбувається сублімація верхнього шару атомів Si і одержана поверхня виявляється покрита атомами вуглецю. Такі поверхні більш практичні, так менш забруднюються з атмосфери і демонструють більшу опірність

окислення. Одночасно, вони можуть бути використані як в електростатичній силовій мікроскопії, де реєструються сили взаємодії зонд-поверхня, так і в скануючій тунельній мікроскопії (СТМ), де реєструється тунельний струм між голкою і поверхнею і потрібна наявність провідності поверхні.

Роздільна здатність і точність скануючого зондового мікроскопу (СЗМ) при дослідженні топографічних особливостей рел'єфу визначається правильним калібруванням сканера в XYZ напрямках і формою кінчика зонда. При калібруванні сканера й тестуванні форми зонда застосовують промислові стандарти. Зокрема, фірми-виробники мікроскопів пропонують ґратки TGT для експресного тестування форми кінчика зонда, існують також зручні TGX й TGG ґратки для калібрування сканера в площині. Для калібрування сканера по висоті в діапазоні 10-1000 нанометрів звичайно використовують паспортизовані еталони висоти, а саме ґратки TGZ. Для визначення граничної латеральної роздільної здатності пропонуються тестові зразки добре орієнтованого піролітичного графіту й підкладки слюди. У даній роботі, як тестові зразки для визначення граничної латеральної роздільної здатності й, одночасно, для калібрування сканера в нанометровому діапазоні були запропоновані поверхні слабо розорієнтованих підкладок 6H-Si(0001)-Si. Такі підкладки шляхом температурного випалювання були однорідно структуровані ступенями з висотами 1.5 нм або 0.75 нм, значення яких відповідають висоті або половині висоти елементарного осередку кристалу 6H-Si у напрямку [0001] і продемонстрували гарні можливості при їхньому використанні, як еталонних структур для СЗМ калібрування вертикальних переміщень у діапазоні декількох нанометрів.

На відміну від СЗМ вимірів топографічного рел'єфу, вимірювання розподілів зарядів і потенціалів за допомогою електростатичної силової мікроскопії і скануючої Кельвін зонд-мікроскопії калібруються поки без використання промислових стандартів. Пов'язано це з певними складностями створення стабільних еталонів для ЕСМ і СКЗМ. В ідеалі, такі еталони повинні мати гладкий на нанометровому рівні топографічний рел'єф й, одночасно, різкі особливості в рел'єфі потенціалу, а по амплітуді не залежні від умов, у яких ведуться вимірювання.

Для калібрування СКЗМ вимірів створювали на поверхні GaAs мікросруктури у вигляді Pt-C пластівців висотою ~ 8 нм і з характерним розміром у площині близько 10 мкм. Такі зразки мали досить різкий потенційний рел'єф, за рахунок сильної контактної різниці потенціалу (КРП) між провідним поверхнями Pt-C й GaAs. Серед недоліків Pt-C зразків слід зазначити, що амплітуда КРП(Pt-C/GaAs) залежить від вологості навколишньої атмосфери й від параметрів освітленості контакту зонд-зразок. При калібруванні вимірів локального опору розтікання досліджувалось відколювання напівпровідникової гетероструктури із ґратками шарів різного легування й товщини. При калібруванні СКЗМ вимірювань ґратки різного легування можуть виявитися не дуже вдалим, тому що амплітуда КРП на шарах різного легування сильно екранується поверхневими станами. По тим же причинам неоптимальним виявляється й еталон на основі планарної ґратки легування в кремнії, пропонується фірмою-виробником НТ-МДТ для методу контактної ємнісної мікроскопії. У цілому, можна констатувати, що проблема еталонів для ЕСМ і СКЗМ вимірів поки ще не вирішена.

Еталон для градування ЕСМ і СКЗМ вимірів може бути, як одномірним, так і двовимірним. Одномірний еталон являє собою різку сходинку поверхневого потенціалу з періодичними комбінаціями двох сходів - тонкі смужки поверхневого потенціалу (тобто дві близько розташованих сходинки потенціалу різного знака) і т.п.. Аналогом одномірних еталонів ЕСМ і СКЗМ вимірів можна вважати ґратки TGZ для калібрування СЗМ вимірів рел'єфу. Використовуючи аналогію з TGT (двовимірні періодичні ґратки гострих Si голочок для визначення форми кінчика зонда), можна створити двовимірний еталон для визначення двовимірної інструментальної функції в ЕСМ і СКЗМ вимірах. Як варіант, цікавими можуть бути двовимірні (2D) періодичні ґратки крапкових зарядів, інжекттованих у діелектрик, наприклад, в окисел на кремнії. Або ґратки нанодоменів поляризації в тонкій сегнетоелектричній плівці. У першому варіанті бар'єром до створення надійного 2D еталону є розсмоктування інжекттованого заряду, тобто швидка деградація еталону. У другому варіанті час життя еталону може бути значно більшим, але при цьому важливо забезпечити гарну планарність тонкої сегнетоелектричної плівки.

Були виготовлені два типи еталонних структур для СКЗМ й ЕСМ вимірів. Напівпровідникові структури на основі GaAs з різким p-n переходом, а також структури з гетерошарами InAs й GaSb, вирощені на InAs(100) підкладці. При створенні еталонних структур ми враховували основні вимоги до ідеального еталону: (1) планарність топографічного рел'єфу, (2) різкість потенційних границь, (3) незалежність амплітуди потенціалу від зовнішніх умов. Планарність (1) поверхні наших еталонів забезпечується практично автоматично, тому що напівпровідникові A3V5-шайби (100) легко розщеплюються уздовж площин спайності (011), створюючи практично атомарно гладкі площини відколу. Якщо зберігати поверхні відколу таких напівпровідників у закритих від пилу контейнерах, то, як показує досвід роботи, поверхня відколу зберігає свою атомарну гладкість роками.

Одним із підходів до калібрування СКЗМ вимірів є використання еталонів, де на поверхні GaAs розміщуються мікроструктури у вигляді Pt-C пластинок висотою 8 нм і з характерним розміром у площині близько 10 мк. Такі зразки мають досить різку потенційну рел'єфність за рахунок значної КРП між провідними Pt-C і GaAs [1.3]. Однак, Pt-C зразки втрачають точність у випадках, коли амплітуда КРП(Pt-C/GaAs) залежить від вологості навколишньої атмосфери й від параметрів освітленості контакту зонд - зразок. Але в такому випадку негативним моментом є розсмоктування інжектowanego заряду, тобто швидка деградація еталона.

Для калібрування вимірів локального опору розтікання можна використати відкол напівпровідникової гетероструктури з решіткою шарів різного легування й товщини. Роздільна здатність СКЗМ вимірювань для реального зонду може бути визначена експериментально по відгуку на різкий ступінь в потенціалі на поверхні тестового зразка, а також за допомогою числового моделювання експериментального відгуку СКЗМ в режимі реєстрації сили на ступінчатий перепад напруги в 1В на ділянці сколу зразка GaAs, куди виходив ростовий p-n перехід шириною 300 нм.

Було проведено числове моделювання одержаного результату. Для цього було застосовано відносно простий спосіб моделювання електростатичної взаємодії між зондом та поверхнею, розглянутий в [1.8]. Для відомої геометрії системи зонд – по-

верхня і розподілу потенціалів на зонді і поверхні можна знайти розподіл зарядів на всіх електродах, який міг би забезпечити заданий розподіл потенціалів.

Розв'язання цієї задачі зводилось до рішення інтегрального рівняння Фредгольма відносно невідомого розподілу зв'язаних зарядів. Встановивши розподіл зарядів на електродах, вже не важко віднайти повну силу взаємодії та відповідні ємності між зондом та ділянками поверхні, що розглядається, а також похідні цих ємностей. Використовуючи значення ємностей та їх похідних, а також значення потенціалів на необхідних ділянках зразка, знаходиться контактна різниця потенціалу [1.8]. Далі розрахунок послідовно повторюється для різних положень зонду вздовж необхідного напрямку на поверхні.

Для моделювання даних розглядався зразок, який складався з двох нескінчених електродів з нульовим та одиничним потенціалом, розділених непровідним зазором шириною 300 нм. Високе узгодження між експериментом та обчисленнями було одержано для модельного зонду згідно паспортних параметрів зонду, а саме: висота конусовидної піраміди 15 мікронів, кут конусності 22 градуси, радіус спряженого з конусом сферичного сегменту 30 нм, що підтверджує коректність вибраного методу моделювання. Відмітимо, що і експеримент, і моделювання демонструють розширення (приблизно в два рази) профілю потенціалу на р-п переході при СКЗМ вимірюваннях в режимі реєстрації сили [1.8].

Вказані вище параметри модельного зонду були використані для знаходження апаратної функції зонду $A(x)$, що визначається співвідношенням:

$$S^{\theta}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(x - x')\theta(x')dx' \quad (1.26)$$

де $S^{\theta}(x)$ - чисельно промодельований розподіл сигналу КРП, $\theta(x)$ - істинний розподіл потенціалу на електродах зразка у вигляді ступеневої функції одиничної висоти. $A(x)$ обчислюється за відгуком $S^{\theta}(x)$, як $A(x) = -\frac{dS^{\theta}(x)}{dx}$. Ширина $A(x)$ на напіввисоті контуру складає 160 нм, що наближено дає роздільну здатність СКЗМ вимірювань при вибраній відстані зонд – поверхня 20 нм.

Таким чином, при розробці архітектури еталонів для СКЗМ і ЕСМ вимірів були враховані основні вимоги до ідеального еталону: планарність топографічного

рел'єфу, різкість потенційних границь, незалежність амплітуди потенціалу від зовнішніх умов.

Для цієї мети було використано напівпровідникові структури на основі GaAs з різким p-n переходом. Планарність поверхні еталона в такій структурі забезпечується практично автоматично, тому що дослідження ведуться в області виходу p-n переходу на атомарно гладку площину відколу. При забезпеченні нескладних умов зберігання поверхні зразка напівпровідникової структури на основі GaAs, поверхня відколу зберігає свою атомарну гладкість роками. Різкість потенційних границь можна налаштувати, варіюючи рівні легування [1.4]. Замість вимірів профілю КРП, аналізувались профілі падіння поверхневого потенціалу (ППП) на назад зміщеному переході. При цьому точність амплітуди перепаду потенціалу в 1 вольт забезпечується точністю джерела зовнішньої напруги, що прикладається до еталону.

Для експериментів була використана еталонна структура з nGaAs -2E18, товщина p-шару 3500 нм. При експериментах на еталонну структуру подавали еталонні напруги, що замикають p-n перехід (n- контакт заземлений, а на p-контакті негативний потенціал). Занадто різким p-n перехід зробити не можна, тому що тоді він стане тунельно прозорим, і не вся прикладена еталонна напруга із зовнішнього джерела буде падати на переході [1.3].

Для отримання повздовжніх вольт-амперних характеристик для НКНС застосовувались ЕСМ- методики одержання повздовжніх вольт-амперних характеристик для НКНС Si і з'єднань на основі твердих розчинів АЗВ5. Такі можливості можуть бути використані також для АСМ-реєстрації поздовжніх ВАХ для НКНС.

Суть методу полягає у використанні можливостей техніки атомно-силової мікроскопії (АСМ) для визначення точних параметрів та вивчення електричних і структурних властивостей НКНС, що вертикально ростуть із підкладки (рис.1.6).

Відповідна інформація може надходити шляхом вивчення поздовжніх вольт-амперних характеристик НКНС. Для їхнього одержання зонд АСМ може бути прецизійно приведений у контакт із вершиною НКНС навіть малого діаметра, що дозволить проводити виміри на одиночній конкретній НКНС. Другим контактом

буде підкладка, на якій виросла НКНС. На вершині НКНС може зберігатися нано-острівок золота, що відігравав роль каталізатора при рості НКНС. Це може створити

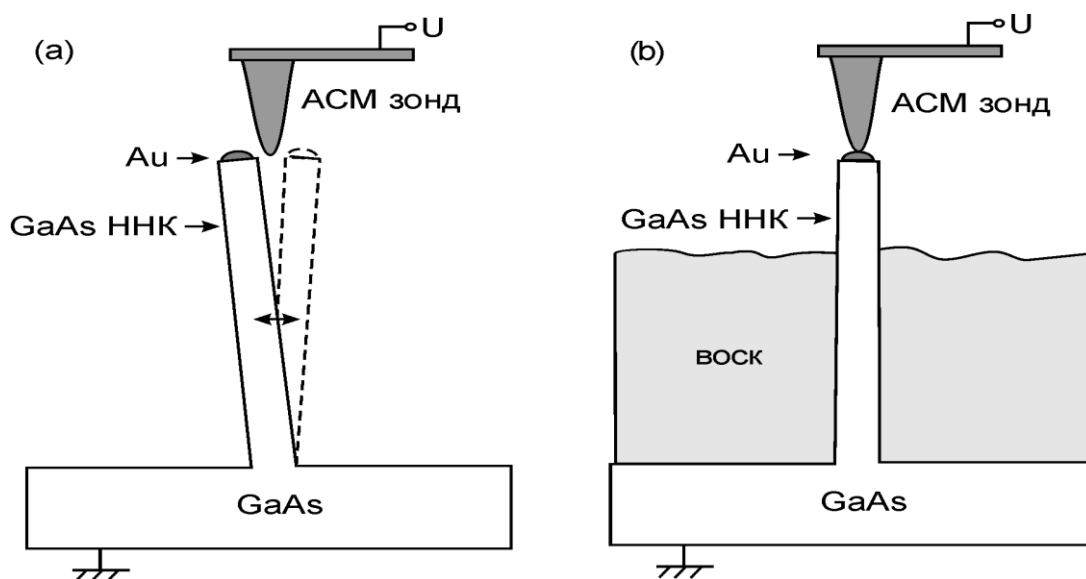


Рис. 1.6. Механічний контакт: (а) -незакріплений НКНС вигинається вбік; б) АСМ-зонд - НКНС стабільний.

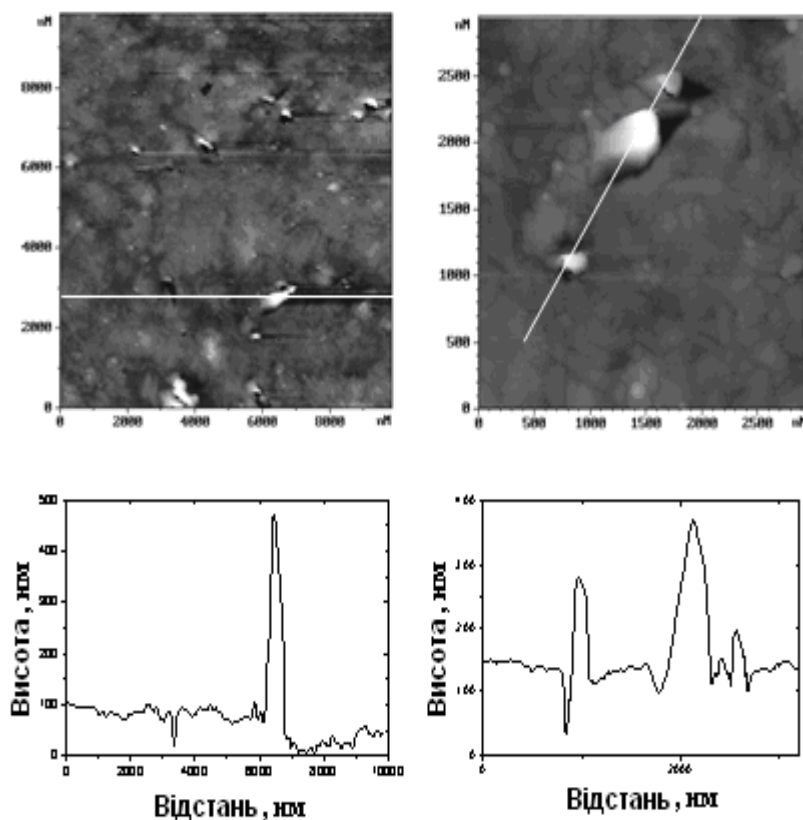


Рис.1.7. АСМ топографії й профілі GaAs НКНС, зафіксованих у фоторезисті.

умови для омичного контакту провідного АСМ- зонда із НКНС і дозволить виявляти по одержуваним АСМ ВАХ-даним інформацію про внутрішній устрій одиночних НКНС.

Дослідження фіксації GaAs НКНС у фоторезисті наведені на рис.1.7, де показані АСМ- топографії й відповідні профілі. Добре видні GaAs НКНС, що піднімаються над поверхнею фоторезисту на десятки нанометрів. При більшому піднесенні понад 200 нм і більше, верхні закінчення GaAs НКНС знову здобувають рухливість.

Для одержання інформації про провідність одиночних НКНС у даній методиці пропонується використати АСМ- моду вимірювання опору розтікання. Потім є можливість прикладати між АСМ- зондом і заземленою підкладкою напругу. Для проведення струмових вимірів на довгих незакріплених НКНС необхідно одержувати інформацію про провідність одиночних НКНС шляхом використання АСМ- моди вимірювання опору розтікання. У цьому режимі АСМ- зонд із провідним покриттям приводиться в механічний контакт із вершиною одного із НКНС.

У випадку НКНС закріпленого воском, контакт стабільний і можна проводити струмові виміри в діапазоні від -10V до +10V і вимірювати протікання через НКНС струму у діапазоні від -20 нА до +20 нА (з точністю 1нА).

Таким чином, у випадку легованої підкладки й провідного НКНС, є можливість одержання вольт-амперної характеристики даного НКНС. У роботі досліджувалися, переважно, GaAs НКНС, одержувані методом молекулярно-пучкової епітаксії.

Для бічної фіксації НКНС нами були випробувані три способи фіксації: у свічковому воску, полімерному позитивному фоторезисті SPR30008 на основі новолакової фенолформальдегідної смоли й за допомогою планарного зарощування ансамблю GaAs НКНС шаром GaAs. У першому випадку на поверхню зразка в обраному місці укладалася крихта воску діаметром 50-100 мікронів, потім зразок нагрівався до температури плавлення воску ($\sim +600^{\circ}\text{C}$). При спостереженні за плавленням в оптичний мікроскоп було встановлено, що розплавлений матеріал периферійної частини

крихти воску розтікається тонким шаром (товщиною 200-500нм) по поверхні між НКНС. Інша частина воску плавиться, але не розтікається по поверхні, а створює рідку краплю. Потім зразок охолоджується до кімнатної температури й віск затвердіває. Таким чином, виникала можливість зафіксувати GaAs НКНС воском.

За допомогою оптичного мікроскопа є можливість досить точно вибрати місце сканування поблизу границі застиглої краплі воску. Таким чином, можна вибрати ділянку, де віск майже цілком закриває НКНС і лише мала частина довжини НКНС піднімається над воском. У такій ситуації НКНС закріплений воском й, виникає можливість проводити струмові виміри.

Виявилося, що при затвердінні воску часто відбувається обламання GaAs НКНС нижче поверхні воску, що приводить до зникнення електричної провідності через частину GaAs НКНС, що піднімається над поверхнею воску. Тому нами був випробуваний другий спосіб фіксації GaAs НКНС у фоторезисті, що має менші здвигові зусилля при затвердінні. У цьому випадку не спостерігалось сколювання GaAs НКНС при затвердінні фоторезисту.

Таким чином, був отриманий важливий висновок про необхідність майже повного досить точного покриття GaAs НКНС фоторезистом. При цьому, довжина GaAs НКНС звичайно становить приблизно 1 мкм. У цьому випадку це, природно, є важко досяжним. Другою обставиною, що заважає, є недостатня механічна міцність матеріалу фоторезисту, що приводить до його переносу на закінчення зонду АСМ, а з нього й на досліджуване закінчення GaAs НКНС. При цьому ізолюючі властивості нанесеного фоторезисту роблять неможливими електричні виміри на НКНС.

Проте, фіксація GaAs НКНС у фоторезисті може бути застосована для одержання поздовжніх ВАХ АСМ -методом у моді реєстрації струму між зондом АСМ і верхнім закінченням НКНС.

Як правило, висота НКНС у десять і більше разів перевершує діаметр й у цьому випадку НКНС має малу бічну твердість і при контакті з АСМ -зондом легко вигинається вбік. Для визначення величин коефіцієнта бічної твердості характерною величиною є коефіцієнт бічної твердості:

$$k_{\text{біч}} = E \cdot R^4 / L^3 \sim 0.1 \text{ N/m} \quad (R=50 \text{ нм}, L=1-2 \text{ мкм}). \quad (1.27)$$

Для визначення величин сили притиску АСМ- зонда використовується величина сили притиску АСМ- зонда: $F=10\text{Н}$.

Для визначення ступеню величини бічного вигину використовували оцінку величини бічного вигину: $W_{\text{біч}}=100 \text{ нм}$.

Вимірювання проводились зондом NSG11/Pt на відстані до поверхні 20 нм. Видно, що перепад напруги, який вимірювався, складає приблизно 70% від того, що прикладався на перехід зовнішньої напруги в 1В.

В результаті досліджень по вимірюванні розподілу зарядів і потенціалів в ЕСМ за допомогою експериментальних зразків еталонів, які мали гладкий на нанометровому рівні топографічний рел'єф, різкі границі в рел'єфі потенціалу та незмінні амплітуди, не залежні від умов вимірів, показали можливість застосовувати напівпровідникові структури на основі GaAs з різким p-n переходом для проведення вимірів у ЕСМ, що дає можливість одержувати необхідну точність при виготовленні наноструктур за допомогою нанолітографа.

Виходячи з досліджень, можна стверджувати, що еталонна структура з різким p-n переходом може застосовуватися для калібрування СКЗМ вимірів при подачі каліброваного зсуву від 1 до 8 вольтів на замикаючий перехід. При цьому для обчислення інструментальної функції СКЗМ досить продиференціювати профіль усередненого й нормалізованого сигналу падіння поверхневого потенціалу.

При виготовленні транзисторів з розмірами менше 100 нм за допомогою класичної МОН - технології виникає ряд проблем. Зокрема, важливою проблемою є змикання областей збіднення витоку і стоку за рахунок зворотнього зміщення переходу стік-база, оскільки при певних умовах довжина каналу транзистора стає порівняною з областю просторового заряду стокового переходу.

При довжині каналу транзистора в десятки нанометрів способом, що дозволяє мінімізувати ефект змикання, є перерозподіл потенціалу в базі транзистора за рахунок напруги на додатковому затворі [1.4]. Також для вирішення зазначеної пробле-

ми використовується збільшення ступеня легування бази. Для цього можна запропонувати конструкції нанотранзисторів з різними затворами:

- з стороннім затвором, що знаходяться в площині каналу;
- тривимірним затвором, який має оперізувальний канал з трьох сторін;
- тривимірним затвором, що оперізує кожен з n-каналів багатоканальної конструкції.

Розглянемо принцип роботи наноприладів на основі використання одноелектронного транспорту (рис.1.8).

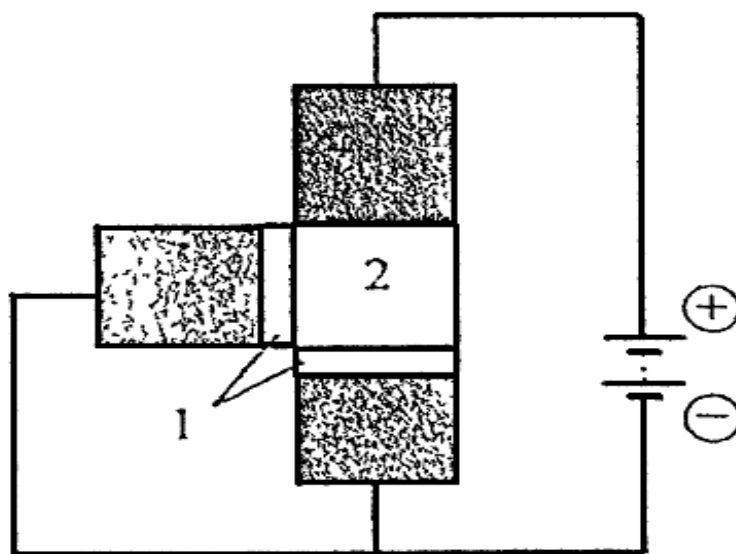


Рис.1.8. Принцип роботи наноприладів на основі використання одноелектронного транспорту.

У конструкції приладу передбачається два ізольованих переходи- для входу і виходу окремих носіїв струму у вигляді електронів. Такий прилад можна розглядати як польовий транзистор, в якому канал замінений двома тунельними переходами 1, які оточують металевий «острівець» 2. Напруга, що прикладається до електрода переходу, варіює щільність енергії, необхідну для зміни концентрації носіїв на «острівці».

Побудова одноелектронних приладів, створених літографічно певними затворами, є ідеальним варіантом для виготовлення приладів з відтвореними характеристиками. Однак це питання не тільки літографії і структурної досконалості створюваних приладів з використанням технології – кремній на ізоляторі (КНІ), але і питання

розробки технології нанесення в нанометрові зазори між протравленими областями шару кремнію альтернативних SiO_2 діелектриків з високим значенням діелектричної проникності.

Використання літографічних процесів при визначенні розмірів острівців кремнію поряд з електростатичним керуванням величиною потенційних бар'єрів дозволяє отримувати транзисторні наноструктури з відтвореними характеристиками. Реалізуючи латеральне структурування КНІ, можна формувати керуючі сторонні (пальчикові) затвори різних конфігурацій. Для отримання приладів, що працюють при кімнатній температурі з відтвореними параметрами, необхідно їх розміри зменшувати до величин, менших за розмірами від самоформуючих квантових крапок, або забезпечити високу ступінь гладкості оброблюваної поверхні і виключити варіювання ширини КНІ - дротика. Дотримання наведених вимог дозволить забезпечити досягнення рівня літографічного процесу з роздільною здатністю в одиниці нанометрів [1.9].

Оскільки необхідно отримувати не тільки окремі транзистори, а й формувати з них блоки пам'яті в надвеликих інтегральних схемах (NBIC), то важливим є сумісність одноелектронних транзисторів з іншою частиною схеми (в першу чергу з підсилювачем). Важливою перевагою одноелектронних транзисторів є можливість створення гібридних схем -одноелектронний транзистор / МОН-транзистор. При цьому перевагою КНІ- транзисторів різних конструкцій є їх сумісність з існуючою кремнієвої технологією.

1.4. Використання моделюючих систем при створенні технологічних процесів формування структур для побудови наноприладів.

З розглянутої структурної моделі системи сканування впливають такі методи вдосконалення систем сканування:

- 1) Підвищення лінійності системи сканування за рахунок поліпшення характеристик матеріалів, з яких виготовлені приводи відхилення вістря (перетворювачі «сигнал» - «переміщення»).

- 2) Застосування нелінійних цифроаналогових перетворювачів, за допомогою яких можна компенсувати нелінійність.

3) Введення електричних зв'язків між цифроаналоговими перетворювачами і функціональними перетворювачами для компенсації нелінійності. Вимоги до швидкодії функціональних перетворювачів визначаються достатнім часом переміщення вістря, яке може перебувати в діапазоні десятків-сотень наносекунд для високопродуктивних систем.

4) Корекція даних відхилення методом апроксимації тим чи іншим способом експериментально виміряної зворотної функції.

Отримання нанорозмірних плівок висуває значно жорсткіші вимоги до чистоти і структурної якості в порівнянні зі звичайними субмікронними структурами. Формування нанорозмірної плівки товщиною в кілька атомних шарів зривається при наявності домішок і сторонніх включень, а також при низькій структурній якості.

Особливу важливість, крім вимог чистоти, для отримання нанорозмірних плівок представляє можливість створення нанорозмірного зображення на поверхні нанорозмірної плівки. Якщо для мікроелектроніки отримання таких зображень забезпечувалося шляхом створення необхідного малюнка на поверхні плівки з наступним фіксуванням елементів малюнка за допомогою видалення непотрібного матеріалу, то для нанотехнології доступним методом є формування плівок, що складаються з прецизійно-локалізованих груп атомів.

Однак використання тунельних-зондових методів, як методів індивідуальної обробки може бути виправдано тільки в поєднанні з методами електронної або йонної літографії. Одні тільки тунельно-зондові методи індивідуальної обробки технологічно не сумісні для обробки площ - 1 мкм^2 і менше, оскільки для висадки на таку площу необхідних атомів зі швидкістю 10^2 ат/с необхідно забезпечити час роботи тунельно-зондового літографа до 100 годин при збереженні відтворюваних результатів [1.4, 1.8].

Навпаки, перехід від тунельно-зондових методів індивідуальної збірки молекулярних структур до групових за допомогою багатовістревих комплексів дає можливість використовувати скануючий тунельний літограф досить ефективно. Необхідним ключовим процесом при використанні скануючого тунельного літографа є

тунельно-зондовий масоперенос, що полягає в створенні в тунельному проміжку між голкою-зондом і підкладкою рел'єфу заданої структури.

За допомогою тунельного зонда в скануючому тунельному літографі можна не тільки досліджувати рел'єф поверхні, але і здійснювати зміну цього рел'єфу і робити його структурні перетворення. Тунельний зонд являє собою голчастий електрод з радіусом вістря менше 10 нм. Міжелектродний зазор між голчастим електродом і підкладкою становить проміжок до 10 ангстрем. При цьому в міжелектродному просторі легко створювати електричні поля високої напруженості - до 10^8 В / см. Ці поля викликають значні електростатичні сили, що дають можливість отримувати локальну пластичну деформацію одного з електродів і ряд інших ефектів. Можливо також отримання локального глибинного модифікування напівпровідникових і металевих матеріалів з утворенням в локалізованій області видозмін структури, що відрізняються від основної хімічною будовою і типом провідності [1.10].

На відтворюваність результатів вимірювання параметрів одержуваної структури в тунельному літографі впливає структура вістря голчастого зонда, оскільки з розміром, формою і хімічною природою вістря пов'язані не тільки роздільна здатність, але і структура поверхні, яка отримується при тунельному нанолітографуванні.

1.5. Математичне моделювання нанотехнологічних процесів створення нанороботів за допомогою програми NanoXplorer.

Можливість створення наносистем, здатних мати функції нанороботів, може бути реалізована за допомогою програми NanoXplorer компанії nanoTITAN [1.11]. За принципом роботи така програма близька до інженерної програмі AutoCAD, за допомогою якої розробляють нові машини і механізми, в т.ч. і мікроелектронні пристрої. Подібний підхід можливий при конструюванні нанопристроїв з функціями нанороботів.

При цьому стає можливим використовувати інструментарій, що застосовується у виробництві нанофабрик з описом наноструктур на різних стадіях їх розробки та виготовлення. Так наприклад, для опису продукту мікронних розмірів необхідно врахувати взаємне розташування трильйонів атомів, складових продуктів. Однак

при введенні різних «шаблонів» і готових вузлів, опис можна звести до файлу малого розміру, що містить набір і опис шаблонів, конструктивних частин та їх взаємозв'язків. Якщо необхідно створити заповнення певного обсягу, то це можна описати за допомогою «шаблону» елементарної одиниці об'єму, і використовувати потім цей шаблон стільки разів, скільки необхідно для заповнення необхідного обсягу.

Опис дизайну конструктивних наночастин повинен бути параметричним. Якщо необхідно побудувати нанотрубку, наприклад, то необхідна модель однієї секції нанотрубки необхідної довжини. Задавши потім довжину нанотрубки, програма дублює модель однієї секції потрібну кількість разів.

Приведена технологія використовує ієрархічну мову опису наноструктур nanoML (на основі мови XML)[1.11]. Ознайомитися з нею можна за адресою: <http://nanotitan.com/...taNanoML.htm>. За допомогою цієї мови можна описати наносистему на молекулярному рівні, а також визначити її основні електричні, оптичні, просторові властивості, інформацію про застосування.

Структура мови дозволяє змінювати моделі, вводячи нові елементи зв'язку та ін. Також можна визначати користувальницькі класи, використовуючи ті ж ієрархічні моделі. Модель починається з нанопристрою - вищої ієрархічної одиниці.

Далі модель описується окремими наносистемами і молекулярними машинами, які, в свою чергу, розгортаються в набір молекул, нанотрубок, інших конструктивних елементів і взаємозв'язків між ними. Для полегшення роботи з мовою nanoML можна користуватись програмою NanoXplorer, що дозволяє створювати моделі нанопристроїв за прикладом програми AutoCAD (рис.1.9).

Відмінності, зрозуміло, є, однак проектувати нанопристрої в програмі NanoXplorer набагато легше, ніж, наприклад, в Chem 3D, яка обмежується проектуванням і тестуванням окремих вузлів наномашин.

Розглянемо більш детально можливості програми NanoXplorer. Її демоверсія знаходиться за адресою: <http://nanotitan.com/...ad/index.htm>. Система демонстрації дозволяє використовувати її інструментарій для конструювання складних наносистем, а також отримати доступ до бази даних наноструктур.

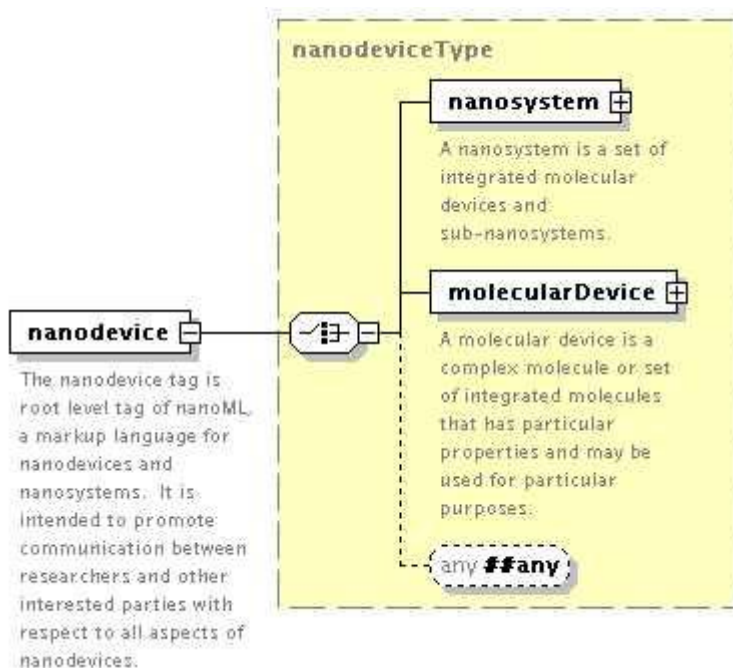


Рис. 1.9. Приклад ієрархії NanoML [1.11].

А створивши свою структуру, користувач може завантажити її в базу даних для користування нею (рис.1.10).

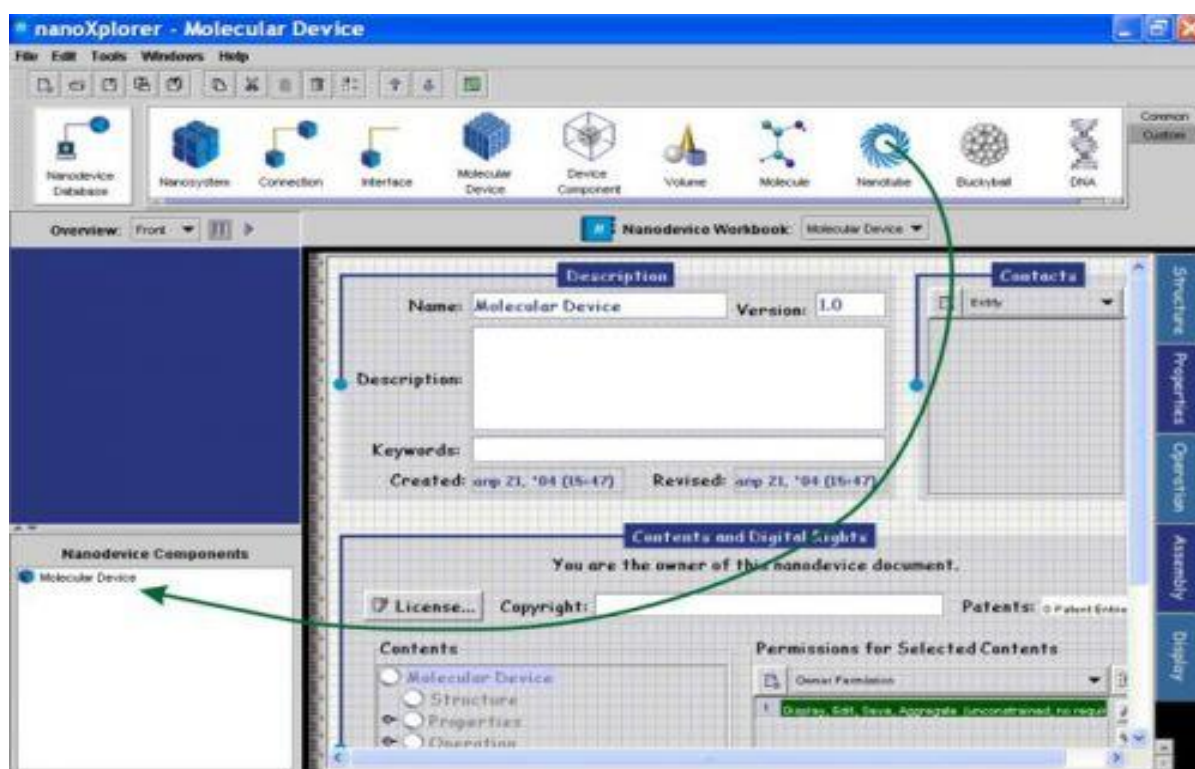


Рис. 1.10. Додавання нанотрубки в модель.

За допомогою вказаної бази даних можна використовувати в моделі вже створені готові структури нанопідшипників, а також валів, комп'ютерів, двигунів і маніпуляторів нанодіапазону. При необхідності цю програму можна замовити в Росії і країнах СНД від компанії-представника Nanotechnology News Network.

Таким чином, база даних постійно доповнюється новими моделями наноструктур. У базі даних можливий пошук за назвою (при введенні, наприклад, «наноманіпулятор» - програма шукає його модель, яка потім передається в програмне середовище. Для цього ми перетягуємо мишкою об'єкт Nanotube в менеджер ієрархії Nanodevice Component, визначаючи далі її характеристики - довжину, діаметр, склад.

За допомогою програми можна створювати моделі різної спрямованості: від біочипів і штучних ензимів до нанороботів. Конструювання наносистем можна виконувати у вигляді молекулярних машин (Molecular Device). Їх можна або імпортувати в програму в уже нам знайомому *. Pdb форматі, або зібрати в програмі, або написати на мові nanoML. Наприклад, необхідно побудувати систему з нанотрубки, усередині якої буде фулерен (може використовуватися при моделюванні судин).

Відкриваємо далі вертикальну закладку праворуч Display і можемо бачити схематичне зображення нанотрубки. Бачимо під моделлю повзунок масштабу, за допомогою якого можна змінити масштаб моделі в широких межах. Також відображаються реальні розміри об'єкту, що важливо для інженерного проектування.

Далі вибираємо з лінійки інструментів фулерен і тягнемо його в менеджер ієрархії Nanodevice Component таким же чином, як ми створювали нанотрубку. З меню виберемо фулерен C26. За допомогою закладки Structure розмістимо фулерен усередині нанотрубки, попередньо повернувши її. Потім змінимо параметри нанотрубки, вибравши у верхній закладці (5,5нм) Carbon Nanotube (нанотрубка візьметься в синю сітку) і натиснувши на кнопці Edit зверху вікна зображення. Поставимо повзунком Arm Chair радіус не менше 0,7 нм, а повзунком Length довжину не менше 3 нм. У нанотрубку такої конфігурації без особливих зусиль увійде фуллерен і буде вільно по ній переміщатися. Те, що на малюнку фулерен значно менше нанотрубки, пояснюється каркасною візуалізацією.

Використовуючи візуалізацію поверхонь мінімальної енергії, ми побачимо, що фулерен «щільно» входить всередину нанотрубки. Для перегляду моделі використовуємо кнопки осей координат, намальовані зверху. Таким чином створюється найпростіший нанопристрій. Більш складні наносистеми вимагають детального опису. Це і зв'язки між компонентами, і електрохімічні властивості молекул, і навіть їх кутові і лінійні швидкості. Модель можна зберегти у форматі XYZ і переглянути за допомогою KVizPro, як і інші моделі.

Необхідно підкреслити важливість реалізації моделювання процесу створення простого наносенсорного пристрою за допомогою програми NanoXplorer, в якій початковою задачею розглядається нанопристрій як вища ієрархічна одиниця. Іншим важливим моментом вказаного моделювання є, як відмічалось вище необхідність якомога повного опису конструктивних складових і взаємозв'язків між ними.

1.6. Висновки.

1. Досягнення необхідної точності позиціонування вістря при створенні наноелектронних структур при наявності нелінійності, гістерезису і інерційності досягається за рахунок введення відповідної корекції даних керування приводом за допомогою програмно- або апаратнореалізованих засобів.

2. Запропоновано методи підвищення рівня лінійності для систем сканування за рахунок поліпшення характеристик матеріалів кантилевера (нановістря) на основі карбиду вольфраму. Застосування нелінійних ЦАП дозволяє компенсувати нелінійність. Введення електричних зв'язків між ЦАП і функціональними перетворювачами також сприяє досягненню компенсації нелінійності.

3. Створені технологічні процеси перетворення даних топології інтегральних наносхем, отриманих при проектуванні, в топологію структурного шару на підкладці. При формуванні структур коректувалися характерні спотворення топології у вигляді зсуву щодо розрахункового положення, зміни масштабу, нелінійності відхилення, обертання, з урахуванням особливостей нанолітографії, зокрема коли топологія шару формується в процесі послідовного переміщення вістря.

4. При розробці архітектури еталонів для СКЗМ і ЄСМ вимірів були враховані основні вимоги до ідеального еталону наноструктур: планарність топографічного

рельєфу, різкість потенційних границь, незалежність амплітуди потенціалу від зовнішніх умов.

5. Перехід від тунельно-зондових методів індивідуального збирання молекулярних структур до групових за допомогою багатовістревих комплексів дає можливість використовувати скануючий тунельний літограф досить ефективно. Необхідним ключовим процесом при використанні скануючого тунельного літографа є тунельно-зондовий масоперенос, що полягає в створенні в тунельному проміжку між голкою - зондом і підкладкою рел'єфу заданої структури.

6. Запропоновано варіант реалізації моделювання процесу створення простого наносенсорного пристрою за допомогою програм, в яких початковою задачею розглядається нанопристрій як вища ієрархічна одиниця. Іншим важливим моментом вказаного моделювання є необхідність якомога повного опису конструктивних складових і взаємозв'язків між ними.

РОЗДІЛ 2.

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ЗОНДОВОГО ОКИСЛЕННЯ І ТУНЕЛЬНОГО-ЗОНДОВОГО МАСОПЕРЕНОСУ.

2.1. Розробка технологічних процесів виготовлення наноструктур на основі методів зондового окислення.

При виготовленні наноструктур на основі методів зондового окислення використовувався зонд атомно-силового літографа для отримання підкладок кремнію для селективного росту наноструктур. З цією метою використовувався заданий алгоритм зміни ростових властивостей поверхні з мінімально можливим кроком в субмікронній області. Окислення поверхні дуже сильно змінює ростові властивості останньої. Наприклад, в методі молекулярно-променевої епітаксії на окислених ділянках поверхні Si важко щось виростити без особливих технічних рішень.

Можливість зростання певних структур на поверхні Si залежить від хімічного стану поверхні в конкретних місцях поверхні Si. Важливим в ростовій технології є стан поверхні кремнію, коли вона пасивована атомами водню. Така ситуація найбільш сприятливо досягається на кристалографічній поверхні Si (111). При такій орієнтації поверхні в поверхневих атомів Si тільки одна зв'язок орієнтований вгору перпендикулярно поверхні і створює максимально зручні умови для захоплення на неї атомів водню, які пасивують поверхню. У цьому випадку можливе зростання ряду сполук в режимі заміщення поверхневих атомів водню атомами нарощеного матеріалу.

Всі літографічні експерименти проводилися на платформі атомно-силового мікроскопу (АСМ) фірми NT-MDT. Для пасивування поверхні шляхом локальної модифікації її ростових властивостей використовувалося анодне окислення під зондом атомно-силового мікроскопа. Однак, таке окислення може виявитися неприйнятним, оскільки руйнується шар водню, пасивований не тільки під зондом, але і в деякому оточенні зонда через виникнення між зондом АСМ і підкладкою значних неоднорідних електричних напруг.

Одним з напрямків зниження такого шкідливого впливу є відпрацювання режимів анодного окислення при мінімально можливих значеннях електричних напруг [2.1-2.3]. Обмеженням на зменшення значень напруг є необхідність отримання окислення поверхні. Однак, ситуація тут досить сприятлива, оскільки немає необхідності в створенні товстих шарів оксиду. Дійсно, товщина пасивуючого багатоатомного шару водню становить частки нанометра, і для його видалення досить створення шарів оксиду товщиною також на рівні часток нанометра. Одночасно для досягнення високої роздільної здатності і ширини окислених ділянок поверхня повинна бути мінімальна.

Були визначені режими анодного окислення на Si під зондом атомно-силового мікроскопа, а також вимоги до проведення АСМ експерименту, що забезпечують отримання окислених ділянок поверхні з шириною на рівні 0,1 мкм при товщині оксиду менше 1 нм. Отримано прямокутні мережеві фігури окислення на поверхні Si з розмірами комірок окислення $500 \times 500 \text{ нм}^2$ з шириною розділяючих смужок окисленої поверхні менше 100 нм.

Розроблено метод, де в процесі росту оксидних нанорозмірних структур бере участь окислювач у вигляді адсорбованої на поверхні підкладки води. Також розроблений метод формування наноструктур шляхом керування швидкістю зростання оксиду металу в залежності від схеми перенесення йонів кисню. При цьому на границі розділу оксид-підкладка використана залежність швидкості росту оксиду від щільності і молекулярної ваги оксиду металу і щільності потоку йонів кисню (2.1):

$$v = \mu_0 J / \rho_0 \quad (2.1)$$

де v - швидкість росту оксиду, ρ_0 - щільність і молекулярна вага оксиду металу, J - щільність потоку йонів кисню в системі зонд-підкладка.

У технологічних процесах створення наноструктур застосовувалися модернізовані системи вібро-і електромагнітного захисту, а також контролю за вологістю в зоні вістря-підкладка. Підкладки використовувалися кремнієві, леговані титаном. Ширина отриманих смужок 30 нм, висота -1-5 нм в залежності від матеріалу кантилевера (вістря). Кращі результати були отримані в кантилеверах з покриттям карбі-

дом вольфраму. За вказаними дослідженнями отримано 7 патентів України на винахід.

2.2. Технологія одержання наноструктур шляхом анодного окислювання під зондом атомно-силового мікроскопа.

Важливість розробки методики ефективної модифікації поверхні легованого кремнію зондом атомно-силового літографа полягає в тому, що можливість росту певних структур на поверхні легованого Si відкриває шлях по налагодження технологічних процесів виготовлення наноструктур необхідної топографії [2.4,2.5]. Складність отриманого малюнку на підкладці залежить від хімічного стану поверхні в конкретних місцях поверхні Si та ряду параметрів, які будуть досліджені та розробні в даній методиці.

Важливим у ростовій технології є стан поверхні кремнію, коли вона пасивована атомами водню, зокрема на кристалографічній поверхні Si (111). При такій орієнтації поверхні створюються умови для захоплення на неї атомів водню для відповідного пасивування поверхні. В подальшому можна вирощувати ряд сполук шляхом заміщення поверхневих атомів водню.

Для пасивованої поверхні природним методом локальної модифікації її ростових властивостей представляється анодне окислювання під зондом атомно-силового мікроскопу[2.6]. Однак, таке окислювання може виявитися досить грубим, руйнуючи шар водню, що пасивує, не тільки під зондом, але й у деякому оточенні зонду через виникнення між зондом атомно-силового літографа (АСЛ) і підкладкою значних неоднорідних електричних напруг.

Як вказувалось вище, для зменшення поверхні окислених ділянок потрібно застосовувати режими анодного окислення при мінімально можливих значеннях електричних напруг [2.1-2.3] при отриманні окислених поверхонь. Враховуючи, що товщина пасивуючого багатоатомного шару водню становить частки нанометра співмірна із створеними шарами оксиду.

При дослідженнях були враховувались режими анодного окислювання на Si під зондом атомно-силового літографа, які дозволяли одержувати окислені ділянки поверхні із шириною на рівні 0.1 мкм при товщині окислу менше 0.5-1 нм. Були одержані

прямокутні сіткові фігури окислювання на поверхні Si з розмірами осередків окислювання $450 \times 475 \text{ нм}^2$ із шириною смужок окисленої поверхні 85-90 нм.

Дослідження проводились в кімнатних умовах на приладі Solver P-47. Анодне окислювання здійснювалося, як у контактному, так і напівконтактному режимах. При цьому напівконтактний режим був визнаний більше прийнятним через більшу стабільність і відтворюваність одержуваних результатів. Під час проведення експерименту в кімнатних умовах відносна вологість становила 43%. Спеціальне підвищення вологості не здійснювалося, тому що стояло завдання виконання анодного окислювання, яке максимально щадить поверхню. Зниження вологості також було не виправданим, тому що приводило до надмірного вповільнення анодного окислювання й одночасно робило його не стабільним.

Важливим у виконанні анодного окислювання є правильний вибір зондів АСМ. Тут існував вибір із трьох типів зондів: чисто кремнієвих, з металевим покриттям Pt і провідним алмазоподібним покриттям. Для ефективних експериментів по анодному окислюванню потрібні добре провідні зонди, якими є зонди з алмазоподібним та Pt покриттям. Перші є найбільш добре провідними, але характеризуються найбільшими радіусами закруглення закінчення - 60 нм. Було побоювання, що такі зонди не дозволять одержати досить вузькі смужки окислювання на поверхні Si. Зонди з Pt покриттям мають радіус закінчення менше, близько 25 нм, але відрізняються слабкою адгезією металу Pt до кремнієвої піраміди зонда. При прикладанні високих напруг наночастинки Pt можуть злітати із зонда, міняючи форму його закінчення й змінюючи провідність. А це може зробити процес анодного окислювання некерованим. Є і останній вибір - зонди з пірамідою просто з високолегованого Si. Такі зонди є самими гострими, радіус закінчення близько 10 нм та мають достатню провідність. Однак, Si зонди мають істотний недолік, а саме, наявність на поверхні шару природного окислу товщиною близько 4 нм. При прикладанні до зонда електричної напруги й протіканні через нього струму має місце нагромадження зарядів у шарі окислу, що також вносить нестабільність в експериментах із протіканням струму. У роботі було проведено порівняння ефективності розглянутих зондів при анодному окислюванні поверхні Si, що проводилося в однакових електричних режимах.

Зонд АСМ приводився в контакт із поверхнею підкладки кремнію й до нього на короткий час прикладалася напруга, негативна щодо підкладки. Потім зонд піднімався, напруга знімалася й вироблявся запис топографії зміненої поверхні тим же зондом у напівконтактному режимі. Так виглядав режим крапкового окислювання. При окислюванні зонд міг також переміщатись уздовж поверхні, залишаючи за собою окислений слід. Так виглядав режим створення на поверхні лінійних структур анодного окислу.

Як відзначалося вище, для досягнення ефективного пасивування поверхні воднем потрібен вибір підкладки Si із кристалографічною орієнтацією поверхні (111). Вибір рівня й типу легування підкладки також є суттєвим для оптимізації процесу анодного окислювання. Підкладка повинна бути високолегованою, щоб електрична напруга, що прикладається, припадала переважно на приповерхневу область під голкою АСМ. Поле поблизу поверхні повинне сприяти проникненню негативно заряджених груп OH^- та іонів O^{2-} під поверхню напівпровідника. Тому на підкладку Si подається позитивна напруга. Приповерхневий вигин зон в Si повинен мати таку ж полярність, що визначає n-тип легування підкладки. У роботі використовувались Si(111) підкладки n-типу, леговані фосфором до рівня 10^{18} см^{-3} .

Перед анодним окислюванням поверхня підкладок ретельно відмивалася й потім проводилася фінішна обробка поверхні, спрямована на додання поверхні гідрофільного або гідрофобного стану. Останнє було важливо, тому що впливало на інтенсивність водного меніска, що виникає на вершині зондової пірамідки при наближенні зонда до поверхні Si.

Відмивання поверхні проводилося по наступній процедурі. Для очищення від органічних забруднень поверхня зразків оброблялась в суміші толуолу й диметилформаміду при температурі 100°C протягом 10 хвилин. Потім очищення поверхні здійснювалося за допомогою доокислення в перекисно-аміачному розчині $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ у співвідношенні 2:1:4 протягом 10 хвилин. На наступному етапі для видалення нарощеного диоксиду кремнію проводилася обробка поверхні в суміші плавикової кислоти й перекису водню $\text{HF} + \text{H}_2\text{O}_2$ у співвідношенні 1:1 протягом 5 хвилин. Очищення поверхні завершувалося кип'ятінням у перекисно-кислому роз-

чині $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 1:1:3$ протягом 10 хвилин. Після кожного етапу очищення поверхня ретельно промивалась в деіонізованій воді й висушувалась в центрифугі. Процедура одержання чистої гідрофільної поверхні на цій стадії завершувалася. Для досягнення гідрофобних властивостей поверхня ще раз оброблялася в плавиковій кислоті з наступним коротким відмиванням у деіонізованій воді.

2.3. Здійснення анодного окислювання на гідрофобній поверхні Si(111) кремнієвим зондом.

Результати попереднього розділу показали, що більш локальне анодне окислювання скоріше можливе на гідрофобній поверхні з істотно меншою товщиною поверхневого вологого шару. Щодо застосовуваних зондів вибір вказує на чисто кремнієві зонди, тому що зонди з покриттям Pt дуже не стійкі до прикладання електричного поля, а зонди з алмазним покриттям не дають помітних переваг, але мають потенційний недолік, пов'язаний з недостатньою гостротою закінчень зондувальних пірамід. На рис. 2.1 показано формування АСМ зображення при постійній силі взаємодії зонду із зразком.

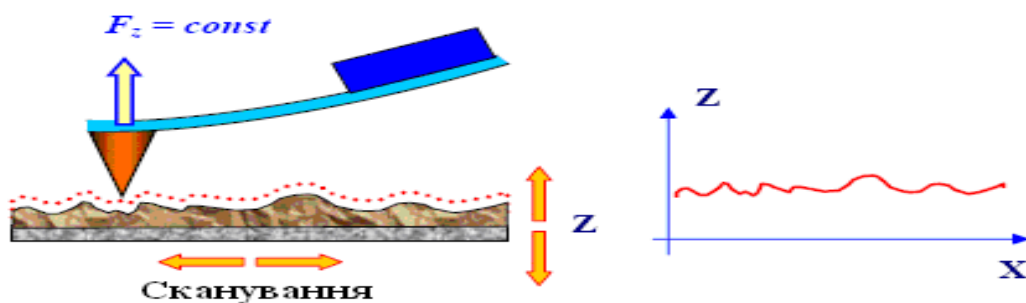
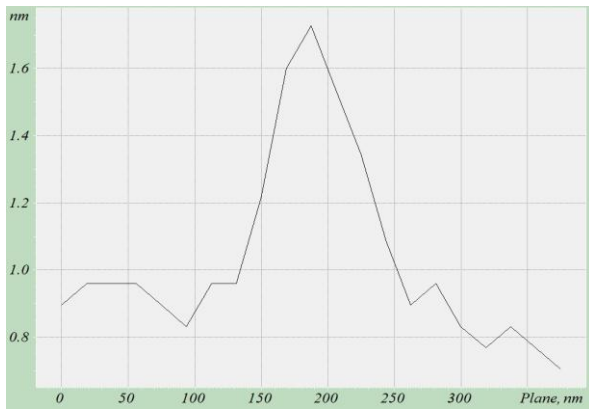


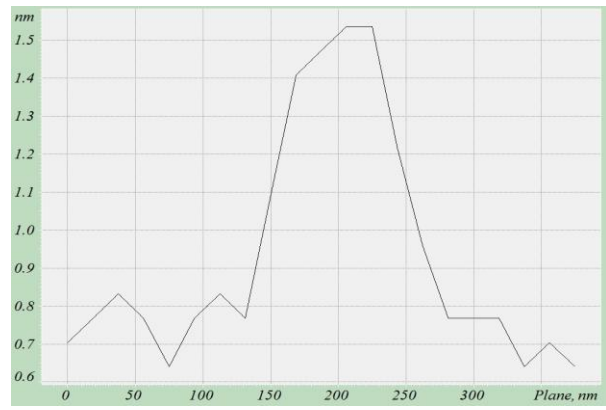
Рис. 2.1. АСМ зображення процесу при постійній силі взаємодії зонду із зразком.

Інтенсивність окислювання на гідрофобній поверхні виявляється не нижче, ніж на гідрофільній, а при малих напругах навіть вище. І при цьому, ширина смужок окислювання по основі виявляється досить помітною.

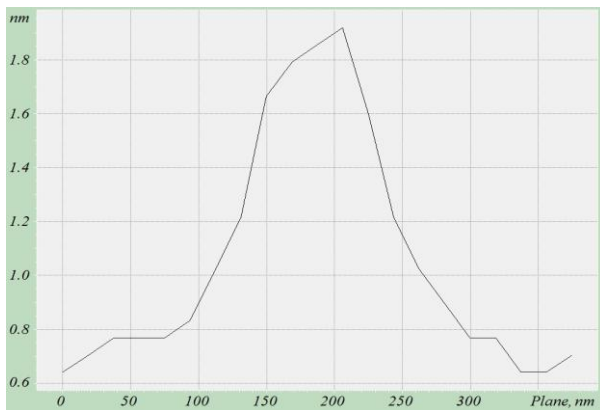
На рис.2.2 наведені профілі смужок окислювань у більшому масштабі. Таким чином, для виконання літографічних дій по здійсненню локального анодного окислювання під зондом АСМ визначається наступний вибір умов: літографію оптимально проводити на гідрофобній поверхні чисто кремнієвим зондом.



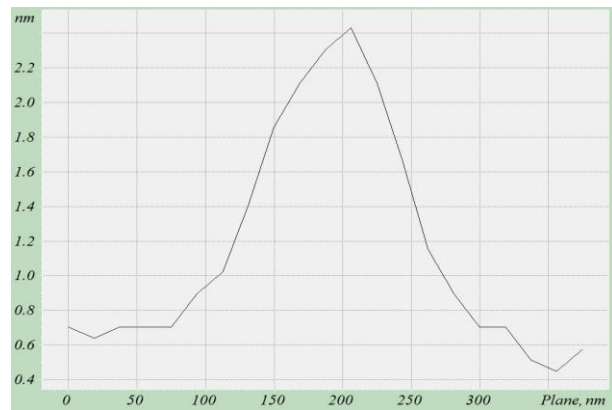
а



б



в



г

Рис.2.2. Профілі окремих смуг окислювання, отриманих кремнієвим зондом на гідрофобній поверхні при напругах $U=5$ (а), 6 (б), 7 (в), 8 (г) В.

Для створення наноструктур використовувались літографічні методи, які є більш доступними в умовах лабораторних досліджень. Серед них можна виділити метод, заснований на локальному зондовому окисненні провідних матеріалів - напівпровідникових підкладок і надтонких металевих плівок. Даний метод застосовують для локальної модифікації властивостей поверхні і виготовлення активних елементів нанoeлектроніки, зокрема, структур для запам'ятовуючих наноприладів. Широке використання процесу локального зондового окислення (ЛЗО) стримується низькою продуктивністю. Вирішення проблеми потребує зменшення тривалості процесу, що забезпечує при цьому ефективне протікання процесу зондового окислення. Для цього необхідні матеріали з високою швидкістю анодного зондового окислення.

Суть методу локального анодного окислення (ЛАО) пов'язана з протіканням електрохімічної реакції під провідним зондом на поверхні, що здатна окислюватись при прикладанні до неї позитивного зсуву напруги відносно зонду. Процес ЛАО можна проводити в атмосферних умовах без занурення в рідину. У вологій атмосфері на поверхні зонду і підкладки є декілька моношарів адсорбованої води, які утворюють з'єднуючий меніск. Такого роду двоелектродна електрохімічна система є своєрідною нанокміркою.

У вологій атмосфері на поверхні зонду і підкладки є декілька моношарів адсорбованої води, які утворюють з'єднуючий меніск. Параметри для протікання електрохімічної реакції під провідним зондом представлені в табл. 2.1.

Табл.2.1. Параметри електрохімічної реакції під провідним зондом.

Умови вологості, %	45
Тривалість імпульсу напруги, мс	300
Середня шорсткість поверхні зразка, нм	0,12
Діаметр оксидних наночастинок, виміряний по піввисоті, нм	10-12

Оскільки поблизу границі розділу метал/оксид плівка збагачена металом, а зовнішня границя - киснем або гідроксильними групами, то виникає вбудоване електричне поле, що знижує загальну напруженість поля в оксиді (Рис.2.3).

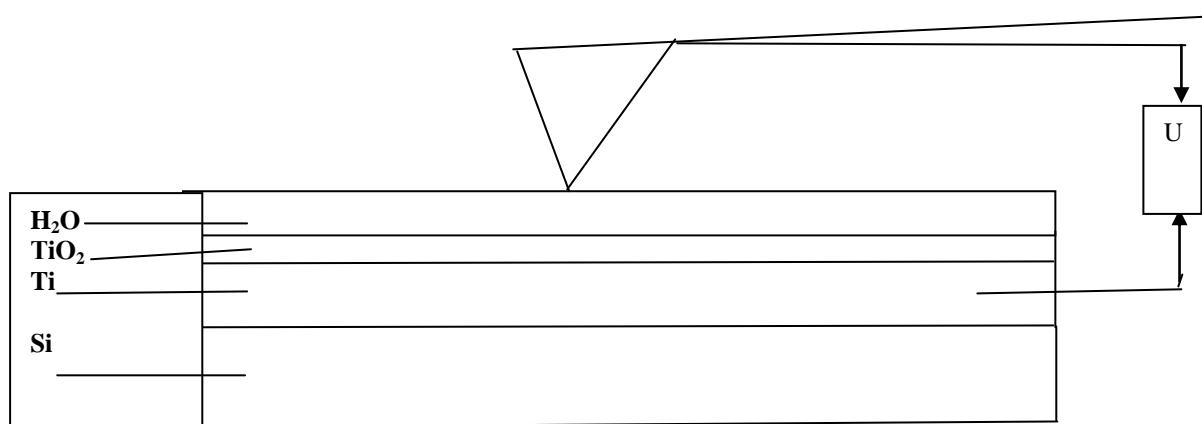


Рис. 2.3. Схема процесу локального анодного окислення за допомогою провідного АСМ - зонду надтонкої плівки титану на поверхні кремнію.

Досягнення необхідної величини роздільної здатності методу локального зондового окислення легованого кремнію залежить від параметрів напруги та висоти оксидних областей, що формуються. Залежність висоти оксидної області від величини прикладеної напруги в зоні провідного зонду приведена в табл. 2.2.

Табл. 2.2. Залежність висоти оксидної області від величини прикладеної напруги в зоні провідного зонду.

Напруга в зоні провідного зонду, В	10	20	30	40	50
Висота оксидної області, нм	3	16	29	51	109

Під дією електричного поля, створеного між зондом і провідною поверхнею, на підкладці утворюються нанометрові окислені ділянки. Як окислювач найбільш часто виступає атмосферна волога, адсорбована на поверхні. Розміри утворених оксидних областей залежать як від електричних режимів модифікації, так і від зовнішніх атмосферних умов.

Вода, що витрачається на окислення, надходить в зазор між зондом і поверхнею з повітря. При постійній різниці потенціалів, що прикладається між зондом і підкладкою, основне падіння напруги відбувається в зростаючому оксиді. Локальний розподіл швидкості утворення оксиду визначається різницею потенціалів в кожній точці, що приводить до залежності товщини оксиду від відстані між зондом і цією точкою на поверхні.

При літографії за допомогою ЛАО змінюється не тільки рельєф зразка, але і локальні електрофізичні властивості його поверхні. Наприклад, при подачі напруги на провідний АСЛ- зонд на поверхні зразка починається електрохімічний процес, і металевий шар під зондом починає окислюватися. Цей метод використовується на повітрі, коли зонд і поверхня матеріалу покриті тонким шаром адсорбованої води. Коли зонд наближається досить близько до поверхні зразка, ці адсорбовані шари стикаються, і внаслідок капілярного ефекту, між вістрям і зразком виникає водяна перемичка. Таким чином, при подачі напруги виникає електрохімічна реакція між зондом і поверхнею зразка у водному середовищі. Якщо поверхня має позитивний

заряд, а вістря - негативний, то вони будуть електрохімічно взаємодіяти відповідно як анод і катод, і безпосередньо під вістрям почне рости оксидний шар [2.1].

Необхідно зазначити, що діаметр оксидних наночастинок, виміряний по піввисоті, становить 8-10 нм. При використанні таких наночастинок в якості елементів ефективна щільність запису інформації може досягати 1 Тбіт/дюйм² [2.1].

Наномодифікація поверхні не обмежується тільки формуванням точок. Використовуючи відповідне програмне забезпечення можна організувати переміщення зонду вздовж заданих векторів і формувати лінії і більш складні об'єкти. За такої технології на плівках легованого кремнію, ванадію та окису титану можна досягати ширини доріжки менше 10 нм. Ширина окисної смужки 8-10 нм дозволяє формувати тунельної-прозорі бар'єри.

У результаті проведення експериментів була відпрацьована методика проведення анодного окислення, що дозволяє стабільно отримувати достовірні результати, які узгоджувалися з літературними даними [2.4]. Також були виявлені фактори, що мають найбільший вплив на процес окислення: величина прикладеної напруги, час прикладення напруги, вологість середовища, сила притиску і відстань від зонда до поверхні.

У пошуках ефективних методів зондових нанолітографічних процесів для легованого кремнію була досліджена технологія наноструктурування напівпровідникових систем при одночасному локальному анодному окисненні і механічній модифікації приповерхневого шару провідним зондом атомно-силового літографа при негативному електричному потенціалі – 10 В. Дана технологія дозволила освоїти принципово новий масштаб розмірів у виготовленні наноструктур (10 – 100 нм). Можливості розробленого методу нанолітографії демонструються на прикладі наномодифікації плівок легованого кремнію при формуванні наноструктурних об'єктів [1.4].

Одним з напрямків зниження такого шкідливого впливу неоднорідних електричних напруг є відпрацювання режимів анодного окислення при мінімально можливих значеннях вказаних напруг. Обмеженням на зменшення значень напруг є не-

обхідність отримання окислення поверхні. Однак, ситуація тут досить сприятлива, оскільки немає необхідності в створенні товстих шарів оксиду.

Залежність висоти утвореного оксидного горбка залежить від тривалості імпульсу напруги, зокрема застосованих в досліді 12 В при товщині титанової плівки 15 нм (рис.2.4 та 2.5).

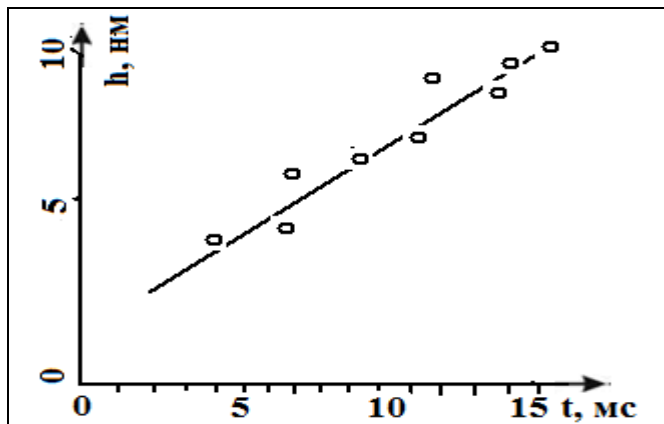


Рис.2.4. Залежність висоти утвореного оксидного горбка від тривалості імпульсу напруги, рівного 12 В при товщині титанової плівки 15 нм.

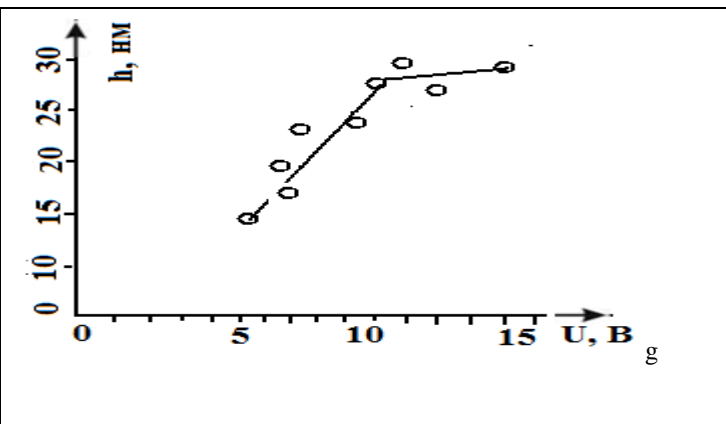


Рис.2.5. Залежність висоти оксидного горбка від прикладеної до зонду імпульсної напруги тривалістю 25 мс з товщиною титанової плівки 15 нм.

Дійсно, товщина пасивуючого багатоатомного шару водню становить частки нанометра і для його видалення досить створення шарів оксиду товщиною також на рівні часток нанометра. При цьому важливим чинником була тривалість імпульсів напруги при отриманні необхідної ширини окисних смужок (рис.2.6 та 2.7).

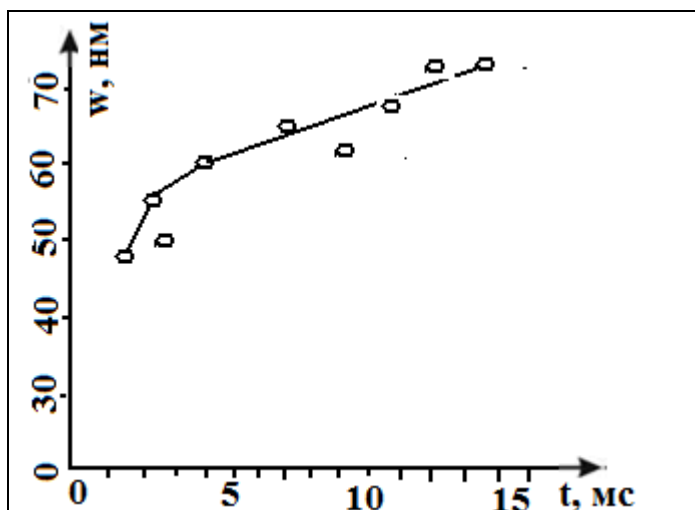


Рис. 2.6. Залежності ширини окисних смужок від тривалості імпульсів напруги 10 В.

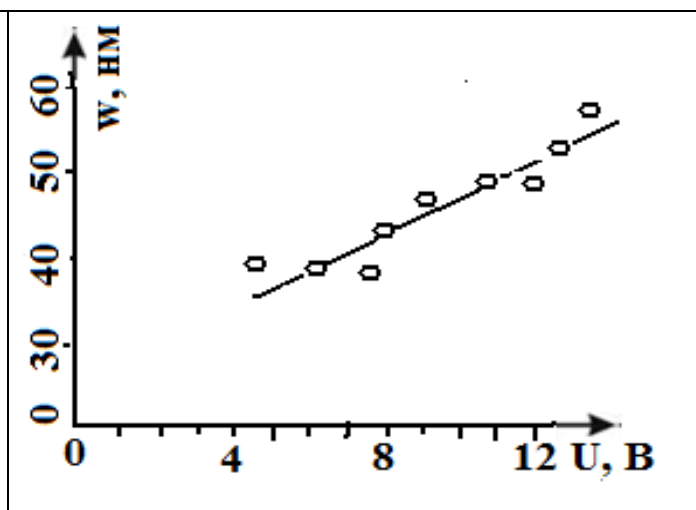


Рис. 2.7. Залежності ширини окисних смужок від величини імпульсів напруги тривалістю 3 мс.

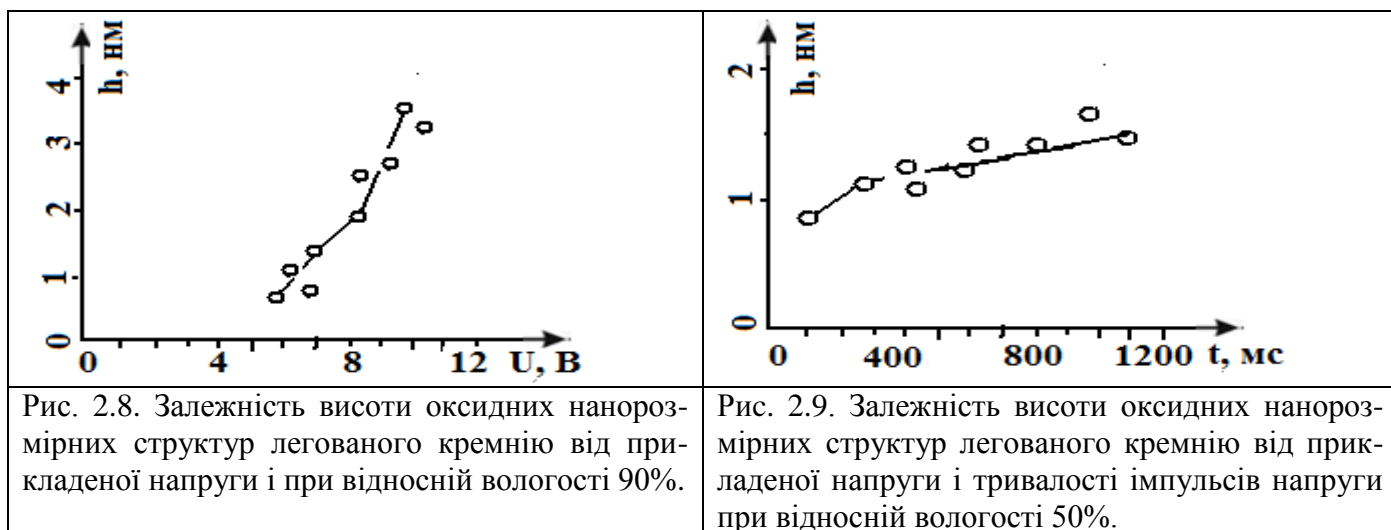
Одночасно для досягнення високої роздільної здатності і ширини окислених ділянок поверхня повинна бути мінімальна.

Були визначені режими анодного окислення на Si під зондом атомно-силового мікроскопа, а також вимоги до проведення АСМ експерименту, що забезпечують отримання окислених ділянок поверхні з шириною на рівні 0,1 мкм при товщині оксиду менше 1 нм. Розроблено метод, де в процесі росту оксидних нанорозмірних структур бере участь окислювач у вигляді адсорбованої на поверхні підкладки води.

Розроблено метод формування наноструктур шляхом керування швидкістю росту оксиду металу від схеми перенесення йонів кисню. При цьому на межі розділу оксид-підкладка використана залежність швидкості росту оксиду і щільності потоку йонів кисню. Наведені методи розрахунків режимів обладнання при виготовленні наноструктур, які включають застосування методів зондового окислення.

В технологічних процесах створення наноструктур застосовувались модернізовані системи вібро- та електромагнітного захисту, а також контролю за вологістю в зоні вістря-підкладка. Підкладки використовувались кремнієві, леговані титаном. Ширина одержаних смужок 30 нм, висота-1-5 нм в залежності від матеріалу кантилевера (вістря). Кращі результати були у кантивелерів з покриттям карбідом вольфраму. По вказаних дослідженнях отримано 7 патентів України на винахід.

Досліджувалась залежність висоти оксидних нанорозмірних структур легованого кремнію від прикладеної напруги та при різній відносній вологості в зоні роботи зонду (рис.2.8 та 2.9).



Показано, що інтенсивність ЛАО поверхні металів і напівпровідників істотно залежить від таких параметрів, як час окислення, вологість повітря, вид окислюваного матеріалу і анод-катодна різниця потенціалів. Експериментально обґрунтована можливість одержання структур, які можуть бути використані в запам'ятовуючих пристроях.

2.4. Моделювання процесу формування наноструктур за допомогою тунельно-зондового масопереносу атомів металу.

Розглянемо систему з тонкого вістря та металевого одноатомного шару на напівпровідниковій підкладці між якими діє зовнішня різниця потенціалів U (рис.2.10). Модельно представимо головку вістря у вигляді кулі з радіусом R , центр якої знаходиться на відстані A від поверхні шару структури, що формується.

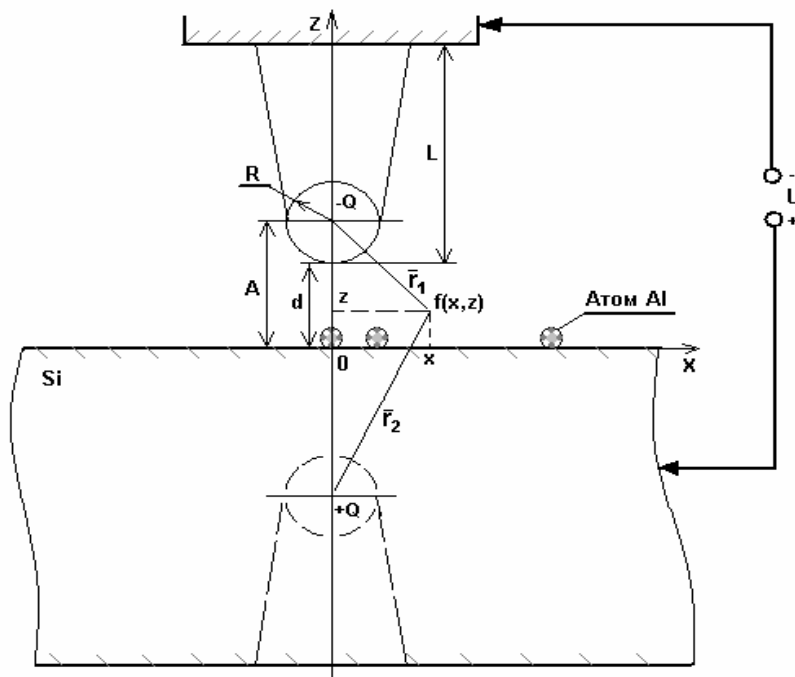


Рис. 2.10. Модельне представлення головки вістря у вигляді кулі з радіусом R , центр якої знаходиться на відстані A від поверхні шару структури, що формується.

Можливості модельного підходу до методу формування наноструктур, в основу якого покладений процес збирання нанoeлементів молекула за молекулою можуть бути значно ефективнішими при умові використання явищ самоорганізації вказаного процесу.

Відомо [2.3], що у цій системі на шар діє механічна сила щільністю

$$F_n = \frac{E_{1z} + E_{2z}}{2} \delta + \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{2} (E_{1z} E_{2z} + E_x^2), \quad (2.2)$$

де δ – щільність поверхневого заряду на межі розділу “вакуум – металевий шар”, E_{1z} та E_{2z} – нормальні складові електричного поля по обидві сторони границі розподілу, E_x – тангенціальна складова поля.

Враховуючи, що у нашому випадку $\delta = 0$, $E_{1z} = E_z$, $E_x = 0$, та скориставшись умовою $\varepsilon_1 E_{1z} = \varepsilon_2 E_{2z}$, отримуємо:

$$F_n = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 E_z^2}{2}. \quad (2.3)$$

Таким чином, для знаходження механічної сили, діючої на атом металу під вістрям необхідно знайти нормальну складову E_z електричного поля на поверхні шару. Для знаходження E_z скористаємось методом дзеркальних зображень [2.7]. Відповідно цьому методу, поле у довільній точці спостереження $\xi(x,z)$ визначиться з виразу:

$$\bar{E}_\xi = -\frac{Q_0}{\varepsilon_1 r_1^3} \bar{r}_1 + \frac{1}{\varepsilon_1} \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \frac{Q_0}{r_2^3} \bar{r}_2, \quad (2.4)$$

де \bar{r}_1 та \bar{r}_2 – радіуси-вектори точки $\xi(x,z)$ відносно заряду Q_0 та його дзеркального зображення у металевому шарі.

Враховуючи, що електричне поле у точці $\xi(x,z)$ є векторна сума полів від заряду Q_0 та його зображення ($\bar{E}_\xi = \bar{E}_1 + \bar{E}_2$), а також враховуючи співвідношення

$$\bar{E}_1 = -\partial U_1 / \partial \bar{r}_1, \bar{E}_2 = -\partial U_2 / \partial \bar{r}_2, \varepsilon_2 = \infty, \quad (2.5)$$

для повного потенціалу у точці спостереження запишемо

$$U_\xi = U_1 + U_2 = -\int \bar{E}_1 d\bar{r}_1 - \int \bar{E}_2 d\bar{r}_2 = -\frac{Q_0}{\varepsilon_1 r_1} + \frac{Q_0}{\varepsilon_1 r_2} = \frac{Q_0}{\varepsilon_1} \left(-\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right). \quad (2.6)$$

або

$$U_\xi(x, z) = \frac{Q_0}{\varepsilon_1} \left(-\frac{1}{\sqrt{x^2 + (A - z)^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + (A + z)^2}} \right) \quad (2.7)$$

Оскільки $Q_0 = CU_0$ (де C – електрична ємність системи “вістря-шар”, $U_0 = U + \Delta\varphi$, $\Delta\varphi = \varphi_{\text{в}} - \varphi_{\text{ш}}$ – контактна різниця потенціалів між вістрям та шаром), тоді для знаходження C можливо скористатись граничними умовами на поверхні кулі:

$$U_{\xi}(x, z) \Big|_{\substack{x=0 \\ z=A-R}} = U_0, \quad (2.8)$$

звідки маємо:

$$C = \frac{\varepsilon_1}{\left| -\frac{1}{R} + \frac{1}{2A-R} \right|}. \quad (2.9)$$

Маючи аналітичний вираз для потенціалу $U(x, z)$, можливо знайти нормальну складову електричного поля E_z [2.6].

$$E_z(x, z) = -\frac{\partial U(x, z)}{\partial z} = \frac{CU_0}{\varepsilon_1} \left(\frac{A-z}{\sqrt{[x^2 + (A-z)^2]^3}} + \frac{A+z}{\sqrt{[x^2 + (A+z)^2]^3}} \right). \quad (2.10)$$

Безумовно, що електрична сила виконує роботу проти сили адгезії атомів металу на підкладці [2.5]. Робота відриву одного атома шару від підкладки буде знайдена з виразу:

$$\frac{F_n}{N} a = F_n a^3 = \Phi, \quad (2.11)$$

де a – період кристалічної решітки речовини шару (береться тому, що робота виконується проти сил, радіус дій яких дорівнює a ; Φ – енергія адгезії в розрахунку на один атом ($\Phi = \Delta H / N_A$, ΔH – енергія адгезії в розрахунку на один моль, $N_A = 6,03 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$).

Враховуючи, що елементарна комірка речовини має n атомів, запишемо:

$$a^3 * (N_A / n) = A_v, \quad (2.12)$$

де A_v – атомний об’єм речовини шару. Таким чином маємо:

$$F_n * a^3 = F_n (n * A_v / N_A) = \Delta H / N_A,$$

Звідки

$$F_n = \Delta H / n * A_v. \quad (2.13)$$

Враховуючи, що

$$E_z(x, z)|_{z=0} = \frac{2ACU_0}{\varepsilon_1 \sqrt{(x^2 + A^2)^3}}, \quad (2.14)$$

$$F_n = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 E_z^2}{2} = \frac{\varepsilon_0 2A^2 C^2 U_0^2}{\varepsilon_1 (x^2 + A^2)^3} = \frac{\Delta H}{n^* A_v}, \quad (2.15)$$

а також враховуючи контактну різницю потенціалів між вістрям та шаром, знаходимо електричну напругу U , що забезпечує формування структури шириною $D = 2x$ [В.9] при заданих параметрах вістря та робочого проміжку:

$$U = U_0 - \Delta\phi = \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \Delta H}{2\varepsilon_0 n A_v}} \frac{(0,25D^2 + A^2)^{3/2}}{AC} - \Delta\phi. \quad (2.16)$$

При отриманні виразу (2.16) не враховувались механічні властивості шару металу, його товщина, можливість автоелектронної емісії в робочому проміжку системи «вістря – підкладка», що на практиці може впливати на параметри формування наноструктур в потужному електричному полі. На рис.2.11 зображені залежності $U = f(D)$, які розраховані на основі формули (2.16) для шарів Al, Ag та Cd на скляних підкладках.

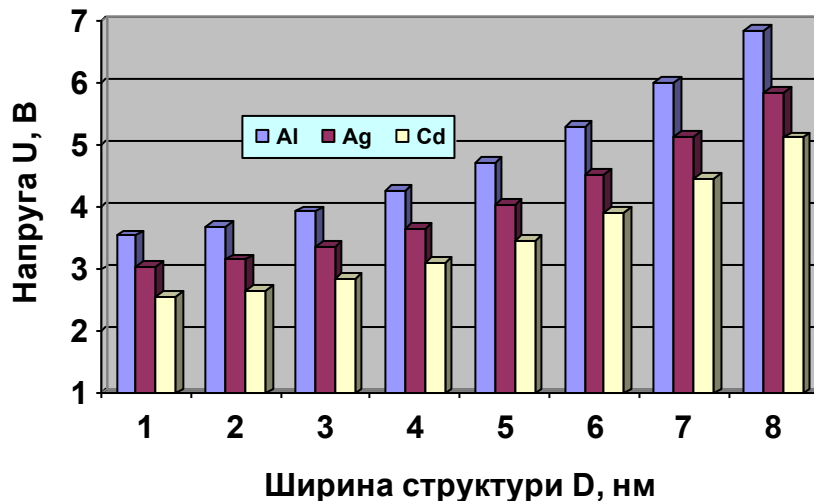


Рис.2.11. Залежність величини електричної напруги U від ширини структури D для Al, Ag та Cd при $R = 5$ нм, $d = 0,5$ нм.

Таким чином, розглянуті можливості створення та використання моделюючих систем для розробки технологічних процесів формування наноприладів є найбільш перспективними методами.

Аналіз отриманого виразу (2.16) вказує на основні фактори, що впливають у даному випадку на робочу електричну напругу вістря U . Це є ширина структури D , період решітки a , робочий проміжок d , відстань A та радіус головки вістря R .

Що стосується властивостей самого матеріалу шару, то їхній вплив (крім a), не буде суттєвим, тому що параметри матеріалу входять під знак квадратного кореня, а абсолютна величина контактної різниці потенціалів, як правило, незначна. Це підтверджують розрахунки залежностей $U = f(D, R, d,)$ для атомів Al , Ag та Cd на скляних підкладках, для яких є данні енергій адгезії.

Вибір та застосування матеріалів у даному випадку треба робити, перш за усе, виходячи з потреб їхньої придатності та ефективності при формуванні наноструктур та приладів молекулярної електроніки.

2.5. Розробка технології нанолітографії для створення нанорозмірних систем запису та зчитування інформації.

У зв'язку з переходом до освоєння елементної бази мікроелектроніки субмікронного діапазону з домінуванням розмірів у десятки та одиниці нанометрів виникає значний ряд задач при освоєнні методів нанотехнології. На першому плані - це задача по створенню базового функціонального елемента наноелектроніки з нанометровими розмірами, на другому – задача здійснення комутації отриманого елемента з іншими подібними елементами, на третьому – проблема створення групових методів обробки.

Дослідження технології нанолітографії для створення нанорозмірних систем запису та зчитування інформації ґрунтувалися на створенні технологічного регламенту створення елементів пам'яті, представленого в табл.2.3.

Табл.2.3. Етапи реалізації технологічного регламенту створення елементів пам'яті на основі нанорозмірних систем запису та зчитування інформації.

Етапи створення елементів пам'яті на основі нанорозмірних систем запису та зчитування інформації.	1. Розробка технології нанолітографії по на- правленному формуванні напівпровідникових структур GaAs та Si.
	2. Використання можливостей нанотехноло-

	гічного модуля для модифікації необхідних поверхонь з атомарною розподільною здатністю.
	3.Розробка системи моделювання середовищ пам'яті з надвисокою щільністю запису інформації – до 10^{12} елементів/см ² .
	4.Створення послідовності етапів по отриманню запам'ятовуючих середовищ з надвисокою щільністю запису інформації.

Серед інших задач актуальними є питання освоєння технології одержання багаторівневих і об'ємних схем, що, у свою чергу, змусить вирішувати проблеми відведення тепла.

Одержання тонких плівок, у тому числі і нанометрових розмірів у достатній мірі освоєно субмікронною технологією при одержанні двовимірних структур за допомогою застосування літографічних процесів. Застосовані літографічні методи дозволяють одержувати на поверхні необхідні структури, що виконують функції елементів електронної техніки.

Одержання нанорозмірних плівок висуває значно більш жорсткі вимоги до чистоти і структурної якості в порівнянні зі звичайними субмікронними структурами. Формування нанорозмірної плівки товщиною в кілька атомних шарів зривається при наявності домішок і сторонніх включень, а також низької структурної якості.

Особливу важливість, крім вимог чистоти, для одержання нанорозмірних плівок представляє можливість створення нанорозмірного зображення на поверхні нанорозмірної плівки. Якщо для мікроелектроніки одержання таких зображень забезпечувалося шляхом створення необхідного малюнка на поверхні плівки з наступним фіксуванням елементів малюнка за допомогою видалення непотрібного матеріалу, то для нанотехнології доступним методом є формування плівок, що складаються з прецизійно-локалізованих груп атомів, що може бути забезпечене за допомогою тунельно-зондових технологій.

Однак використання тунельно-зондових методів як методів індивідуальної обробки може бути виправдано лише в сполученні з методами електронної чи іонної літографії. Одні лише тунельно-зондові методи індивідуальної обробки технологічно не сумісні для обробки площ – 1 мкм^2 і менше, оскільки для висадження на таку площу необхідних атомів зі швидкістю 10^2 ат/с необхідно забезпечити час роботи тунельно-зондового літографа до 100 годин при збереженні відтворених результатів [2.8].

Навпаки, перехід від тунельно-зондових методів індивідуального збирання молекулярних структур до групових за допомогою багатовістревих комплексів дає можливість використовувати скануючий тунельний літограф досить ефективно. Необхідним ключовим процесом при використанні скануючого тунельного літографа є тунельно-зондовий масоперенос, що полягає в створенні в тунельному проміжку між голкою-зондом і підкладкою рельєфу заданої структури.

Наведені результати дослідження процесів виготовлення наноструктур за допомогою вістрів з мінімальним радіусом кривизни при вершині. Приведена послідовність формування мікровістря скануючого тунельного літографа для одержання базових елементів структур пам'яті. На рис.2.12 та 2.13 приведені структури зі смужками анодного окислу, створених під різними атомно-силовими (АС) зондами.

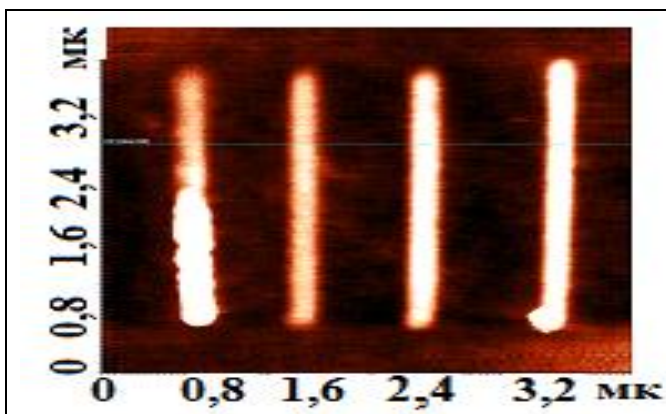


Рис.2.12. Структури зі смужками анодного окислу, створених під АС зондом з алмазоподібним покриттям. Анодне окислювання проводилося при величинах напруги - 5, 6, 7 й 8 Вольт

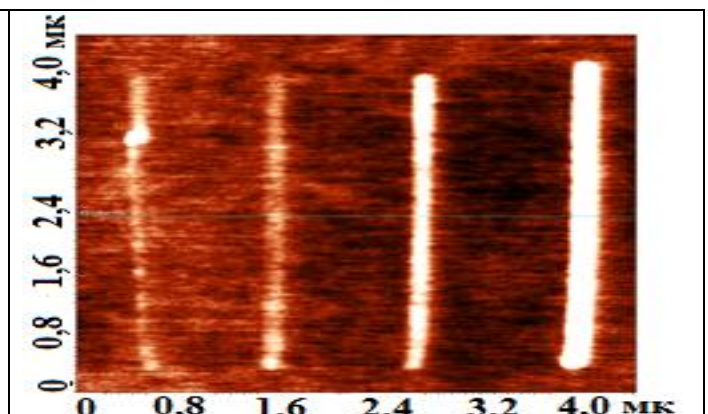


Рис.2.13. Структури зі смужками анодного окислу, створених під АС чисто кремнієвим зондом. Анодне окислювання проводилося при величинах напруги - 5, 6, 7 й 8 Вольт

За допомогою тунельного зонда в скануючому тунельному літографі можна не тільки досліджувати рельєф поверхні, але і здійснювати модифікування цього

рельєфу і робити його структурні перетворення. Тунельний зонд являє собою голчастий електрод з радіусом вістря менш 10 нм. Міжелектродний зазор між голчастим електродом і підкладкою складає проміжок до 10 ангстрем. При цьому в міжелектродному просторі легко створювати електричні поля високої напруженості – до 10^8 В/см. Ці поля викликають значні електростатичні сили, що дають можливість одержувати локальну пластичну деформацію одного з електродів і ряд інших ефектів.

2.6. Дослідження процесів виготовлення наноструктур за допомогою вістрів з мінімальним радіусом кривизни при вершині.

Однією з важливих задач при вирішенні проблем удосконалення процесів тунельної літографії для технології виготовлення наноструктур є одержання вістря з мінімальним радіусом кривизни при вершині. Принцип роботи системи "мікровістря скануючого тунельного літографа - підкладка" розглянуто нижче.

У процесі формування мікровістря після локального оплавлення попередньо легованої кремнієвої пластини електронним променем і наступним її остиганням в рідкій вершині вістря, що формується, виникають сили поверхневого натягу великої величини. У роботі розглянута можливість сил електричного походження переборювати сили поверхневого натягу для одержання мікровістря з радіусом скруглення при вершині порядку 10 нм і менше, аж до втрати стійкості.

Нижче наводимо розрахунки по одержанню вістря з найменшим радіусом скруглення при вершині.

Припустимо, що між кремнієвою пластиною (катодом) і розташованою паралельно їй металевою пластиною (анодом), відстань між якими дорівнює d , підтримується деяка різниця потенціалів U . За допомогою електричного поля, що виникає в зазорі між пластинами, можна змусити поверхню рідини розплавленого легованого кремнію деформуватися і витягуватись в напрямку до анода.

Дослідження процесу формування поверхні мікровістря при наявності електричного поля проводилося на кінцевому етапі формування вістря при максимальному радіусі поперечного перерізу рідкого вістря.

Виділимо дискретне число значень $r < 1$ мкм, зафіксуємо їх у часі і для кожного з них проведемо дослідження: чи існує можливість деформації поверхні рідкого вістря за допомогою сил електричного поля до стану втрати стійкості і наступного стягування поверхні до меншого радіуса скруглення при вершині вістря.

Під час відсутності електричного поля в стані рівноваги на вільній поверхні рідини виконується умова:

$$P_{\alpha} + P_g - P_s = 0, \quad (2.17)$$

де $P = (1/R_1 + 1/R_2)$ - тиск, обумовлений силами поверхневого натягу; α - коефіцієнт поверхневого натягу; R_1 і R_2 – головні радіуси кривизни поверхні; $P_g = \rho g \xi$ - тиск стовпа рідини; ρ - щільність рідини; g - прискорення сили ваги; ξ - відхилення крапок деформованої поверхні від площини, що проходить через лінію розподілу рідкої і твердої фаз, що лежить на поверхні конусоподібного вістря; P_s - внутрішній тиск часток рідини при незмінному об'ємі.

Надалі будемо зневажати тиском стовпа рідини через його малі розміри. Умова рівноваги (2.17) набуде вигляду:

$$P_{\alpha} - P_s = 0 \quad (2.18)$$

Якщо вважати поверхню рідини при відсутності електричного поля сферичною ($R = R_1 = R_2 = r$), то будемо мати:

$$P_s = 2 \alpha / r_0 \quad (2.19)$$

Запишемо умову рівноваги (2.17) при наявності електричного поля з врахуванням зроблених вище припущень:

$$P_{\alpha} - P_s - P_3 = 0, \quad (2.20)$$

де $P_3 = \epsilon_0 E^2 / 2$ - тиск, створюваний електричними силами; E – напруженість електричного поля; ϵ_0 - діелектрична проникність вакууму. Умова (2.20) будемо використовуватись надалі для знаходження різниці потенціалів U , необхідної для переміщення поверхні рідини в кожне наперед задане положення.

Представимо умову рівноваги (2.20) у розгорнутому вигляді:

$$\alpha [1/r_1(x) + 1/r_2(x)] - 2 \alpha / r_0 - \epsilon_0 E^2 / 2 = 0 \quad (2.21)$$

Тут $r_1(x)$ і $r_2(x)$ - головні радіуси кривизни в довільній крапці деформованої поверхні; r_0 - радіус сферичної поверхні рідини до прикладання електричного поля.

Рідка фаза розплавленого легованого кремнію шляхом деформування і витягування в напрямку до анода може бути використана для створення вістря з необхідними параметрами. Розглянемо розрахунки технологічних параметрів в процесі проектування та виготовлення вістрів, які будуть використані для виготовлення базових елементів нанопам'яті.

Для визначення напруженості поля E на вершині одиночного аксиально-симетричного вістря довільної форми можна скористатися емпіричною формулою:

$$E = U / (k r_k) \quad (2.22)$$

де U - різниця потенціалів між анодом і катодом; r_k - радіус кривизни еквіпотенційної поверхні при вершині мікрівістря; k - геометричний параметр, що задається у вигляді

$$k = 1/2 \ln(2l/r_k), \quad (2.23)$$

де l - висота вістря. Геометричний фактор k може бути обчислений більш точно:

$$k = 1/2 \ln\{4dl/[r_k(2d+l)]\}, \quad (2.24)$$

де d - відстань від вершини вістря до площини анода. При $l \ll d$ вираз (2.24) переходить у (2.23).

Припустимо тепер, що деформована поверхня рідини в деякому діапазоні зміни різниці потенціалів U може бути апроксимована поверхнею, рівняння якої має вигляд:

$$x = a e^{-\gamma r} - b, \quad (2.25)$$

де постійні a , b і γ підлягають визначенню з фізичних і граничних умов.

Умова перетинання рідкої і твердої фаз на поверхні мікрівістря дає:

$$x(r_0) = a e^{-\gamma r} - b = 0, \quad (2.26)$$

звідси

$$b = a e^{-\gamma r} \quad 0. \quad (2.27)$$

Запишемо умову рівності об'ємів рідини, розташованої вище лінії перетину рідкої і твердої фаз на поверхні мікровістря ($x=0$), до і після прикладання електричного поля:

$$\frac{2}{3} \pi r_0^3 = 2 \pi \int_0^2 r (a e^{-\gamma r} - b) dr, \quad (2.28)$$

відкіля після інтегрування маємо:

$$r_0^3/3 = a/2\gamma(1 - e^{-\gamma r_0}) - b r_0^2/2 \quad (2.29)$$

Підставляючи в (2.29) вираз для b з (2.26), знаходимо

$$a = (2\gamma r_0^3) / 3 [1 - (1 + \gamma r_0^2) e^{-\gamma r_0}], \quad (2.30)$$

Тоді рівняння поверхні (2.30) прийме вигляд:

$$x = (2\gamma r_0^3) / 3 [1 - (1 + \gamma r_0^2) e^{-\gamma r_0}] (e^{-\gamma r} - e^{-\gamma r_0}), \quad (2.31)$$

де параметр γ підлягає визначенню з умови (2.31).

Якщо прийняти, що на вершині мікровістря $r=0$, то умову рівноваги можна записати в такий спосіб:

$$2a(1/r_k - 1/r_0) - \epsilon/2 U^2 / k^2 r_k^2 = 0. \quad (2.32)$$

Радіус кривизни при вершині вістря визначався по формулі:

$$r_k = \left[\sqrt{1 + (dx/dr)^2} \right]^2 / (d^2 x / dr^2) = 1 / (2a\gamma) = 3[1 - (1 + \gamma r_0^2) e^{-\gamma r_0^2}] / 4\gamma^2 r_0^3 \quad (2.33)$$

Як показали розрахунки, для кожного радіуса кривизни r_0 існує таке значення напруги U , яке обумовлене з (2.32)

$$U = 2k r_{kp} \sqrt{a/\epsilon(1/r_{kp} - 1/r_0)}, \quad (2.34)$$

вище якого умова рівноваги порушується, а поверхневий натяг уже не в змозі зрівноважити електричне притягання, що приводить до некерованого руху рідкої фази до анода і стягування рідини при вершині мікрівістря в крапку.

Змінюючи напругу U у рівнянні (2.32), ми будемо змінювати і форму поверхні рідини, якій відповідає цілком визначене значення параметра γ . Величина γ при фіксованому значенні U знаходилася чисельним методом Ньютона.

Результати розрахунків можуть бути приведені у вигляді залежностей значень величин U і $r_{кр}$ від параметра r_0 при висоті мікрівістря $l = 3, 7, 10$ мкм і $l/d \ll 1$. З аналізу вказаних залежностей можна судити про ступінь впливу сил електричного поля на зменшення радіуса кривизни поверхні рідини при вершині мікрівістря, а також оцінити порядок величин E і U при різних значеннях критичних радіусів скруглення $r_{кр}$.

Для одержання мікрівістрів очищена поверхня легованої кремнієвої пластини КЭФ 7,5 (111) піддавалася дії електронного променя діаметром 4 - 6 мкм протягом 0,2-0,3 сек для створення зони розплаву при напрузі, що прискорює - 50-60 кВ і струмі 100-110 мкА. Після закінчення електронно-променевої обробки кремнієва пластина піддавалася дії електричного поля з напругою між електродами, обумовленою виразом (2.34). Електричне поле, що виникло, змушує поверхню рідкої фази розплавленого легованого кремнію деформуватися і витягуватися в напрямку до анода. У результаті виходить мікрівістря з радіусом кривизни при вершині 10-25 нм. Величина напруженості електричного поля становила $0,4 \times 10^3$ - $1,2 \times 10^3$ В/см. Менші значення є недостатніми і не забезпечують відтвореного досягнення позитивного ефекту. Вищі значення викликають електричний пробій, оскільки локальна напруженість поля в зоні мікрівістря істотно перевищує середню напруженість і росте зі зменшенням радіуса мікрівістря.

2.7. Висновки.

1. Розроблено метод, заснований на локальному зондовому окисненні провідних матеріалів - напівпровідникових підкладок і надтонких металевих плівок. Даний метод можна застосовувати для локальної модифікації властивостей поверхні

і виготовлення активних елементів нанoeлектроніки, зокрема, структур для запам'ятовуючих приладів.

2. У пошуках ефективних методів зондових нанолітографічних процесів для легованого кремнію була досліджена технологія наноструктурування напівпровідникових систем при одночасному локальному анодному окисленні і механічній модифікації приповерхневого шару провідним зондом атомно-силового літографа при негативному електричному потенціалі. Дана технологія дозволила освоїти принципово новий масштаб розмірів у виготовленні наноструктур (10 – 100 нм).

3. Розроблено метод, де в процесі росту оксидних нанорозмірних структур бере участь окислювач у вигляді адсорбованої на поверхні підкладки води.

4. Розроблений метод формування наноструктур шляхом керування швидкістю зростання оксиду металу від схеми перенесення іонів кисню.

5. Розроблено метод одержання мікрівістрів шляхом створення зони розлаву при напрузі 50-60 кВ і струмі 100-110 мкА. Після закінчення електронно-променевої обробки кремнієва пластина піддавалася дії електричного поля з напругою між електродами. Електричне поле, що виникало, змушувало поверхню рідкої фази розплавленого легованого кремнію деформуватися і витягуватися в напрямку до анода. У результаті виходить мікрівістря з радіусом кривизни при вершині 10-25 нм.

РОЗДІЛ 3. ВИКОРИСТАННЯ МЕМРИСТОРНИХ НАНОТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕЗИСТИВНОЇ ПАМ'ЯТІ ReRAM.

3.1. Особливості незалежної резистивної пам'яті ReRAM на основі мемристорів.

В даний час технологія незалежної flash-пам'яті впритул наблизилася до межі масштабування і стикається з серйозними фундаментальними і інженерними труднощами при розмірах менше 10 нм [3.1-3.3]. Дані труднощі визначені самим принципом роботи даного типу пам'яті - реєстрації та перенесення заряду.

В основному, сьогоденні пристрої комп'ютерної пам'яті для зберігання інформації працюють на двох основних принципах. На основі збереження заряду, це наприклад, довготривала flash-пам'ять, або на фіксації рівня падіння напруги на активному елементі пам'яті, це оперативна пам'ять на основі тригерних схем. Це струмові елементи пам'яті. І другий спосіб збереження інформації - магнітний. У цьому випадку зберігається залишкова намагніченість осердя після пропускання струму, або тієї частини феромагнітної поверхні, поруч з якою пройшла електрична котушка головки запису-зчитування машинної пам'яті. Відбувається фіксація рівня і напрямку магнітного потоку частини поверхні.

В пошуках нових видів пам'яті ведуться активні роботи по створенню мікросхем пам'яті з різними принципами запису і зберігання інформації. Однією з таких технологій є незалежна резистивна пам'ять ReRAM (Resistive Random Access Memory).

У зв'язку з цим велика увага приділяється вивченню процесів резистивного перемикавання в тонких шарах напівпровідників і діелектриків. В даному напрямку активно досліджується діоксид титану в зв'язку з виготовленням першого пасивного елемента мемристора на його основі в 2008 році [В.1]. У шаруватих структурах на основі TiO_2 вказана мемристивна поведінка забезпечується кисневими вакансіями на границі метал-оксид.

Мемристор не зберігає заряд, магнітних матеріалів в ньому немає, а його робота забезпечується внутрішньою конструкцією. Розглянемо конструкцію мемри-

стора, описаного в [В.1]. Він складається з тонкої 50-нм плівки, яка включає в себе два шари - ізолюючий діоксид титану і шар, збіднений киснем. Плівка розташована між двома платиновими 5-нм електродами. При подачі на електроди напруги змінюється кристалічна структура діоксиду титану: завдяки дифузії кисню його електричний опір збільшується на кілька порядків (в тисячі разів). При цьому після відключення струму зміни в осередку зберігаються.

Таким чином, значне збільшення електричного опору при подачі напруги на мемристор і збереження зміненої кристалічної структури мемристорної плівки є мемристивним ефектом. На практиці мемристор може приймати не тільки звичайні для чіпів пам'яті два положення - 0 або 1, а й будь-які значення в проміжку від нуля до одиниці, так що такий перемикач здатний працювати як в цифровому (дискретно), так і в аналоговому режимах [2.6]. Зміна полярності струму, що подається, перемикає стан осередку.

Відомо, що товщина і дефектність оксидного шару визначають відношення між електричними опорами структури в низько- (R_{LRS}) і високоомному (R_{HRS}) станах, а значить і її завадостійкість [В.2]. У свою чергу, матеріал і розмір верхнього електрода також впливають на прояв властивостей резистивного перемикування. Мемристивний ефект проявляється не тільки в суцільних оксидних шарах, але і в упорядкованих масивах нанотрубок діоксиду титану, які одержують шляхом електрохімічного окислення титану при різних умовах.

Дуже важливими є дослідження впливу товщини оксидного шару, матеріалу електрода і його площі на процеси резистивного перемикування сендвіч-структур $Ti / TiO_2 / Me$ на основі нанотубулярного діоксиду титану.

3.2. Моделювання мемристивності.

Електричне коло може описуватися чотирма фізичними величинами. Всі ці чотири величини попарно співвідносяться один з одним, причому ці співвідношення представлені в ідеалізованих пасивних елементах електричного кола (рис.3.1). Так, резистор реалізує взаємозв'язок сили струму і напруги, конденсатор - напруги і заряду, котушка індуктивності - магнітного потоку і сили струму. Ці три пасивних елемента - резистор, конденсатор і котушка індуктивності - вважаються базовими в

електротехніці та електроніці, оскільки електричну схему будь-якої складності теоретично можна звести до еквівалентної схеми, побудованої виключно з опорів, ємностей і індуктивностей.

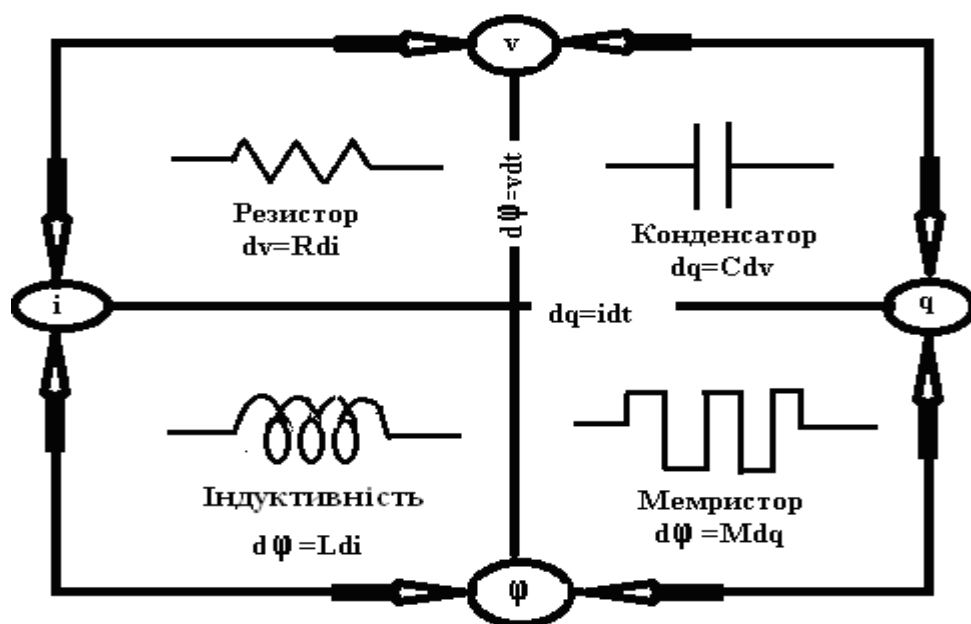


Рис.3.1. Співвідношення базових величин в пасивних елементах електричного кола.

В роботі [3.1] була обгрунтована ідея про те, що є четвертий базовий елемент електричних ланцюгів - поряд з індуктивністю, конденсатором і резистором. При цьому існують шість співвідношень, що зв'язують всі чотири основні змінні електричних ланцюгів: струм i , напруга v , заряд q і магнітний потік ϕ [В.1, 3.1]. П'ять з них відомі. Заряд - це інтеграл за часом від струму. Зв'язок між напругою і магнітним потоком визначається через закон електромагнітної індукції Фарадея. Напруга і струм пов'язані через опір R , заряд і напруга - через ємність C , а магнітний потік і струм - через індуктивність L . Відсутнє шосте співвідношення, що зв'язує потік і заряд. Автор [3.1] припустив, що ці величини пов'язані через "відсутній" елемент - мемристор, що має «мемристивність» M : $d\phi = M dq$ (рис.3.1) [В.2]. Відзначимо, що під потоком в даному випадку слід розуміти інтеграл від напруги за часом. Було показано, що в загальному випадку мемристивність повинна залежати від q . Таким чином мемристор є пасивним елементом в мікроелектроніці, здатним змінювати свій опір в залежності від протікання через нього заряду (інтеграла струму за час роботи).

Якщо скористатися співвідношеннями $d\phi = v dt$ та $dq = I dt$, то можна записати зв'язок між струмом і напругою на мемристорі у вигляді:

$$v = M(q) i \quad (3.1)$$

Очевидно, що у випадку $M = \text{const}$ мемристивність являє собою звичайний опір і (3.1) та перетворюється в закон Ома для ділянки кола.

Понад чверть століття мемристор залишався гіпотетичним елементом ланцюга, який не мав матеріальної реалізації. Але в [В.1] був описаний реальний мемристор. Його властивості відповідали моделі, запропонованої в роботі [3.1]. Мемристор, описаний в [В.1], представляв собою тонкий шар напівпровідникового матеріалу, розміщений між двома металевими контактами (рис.3.2).

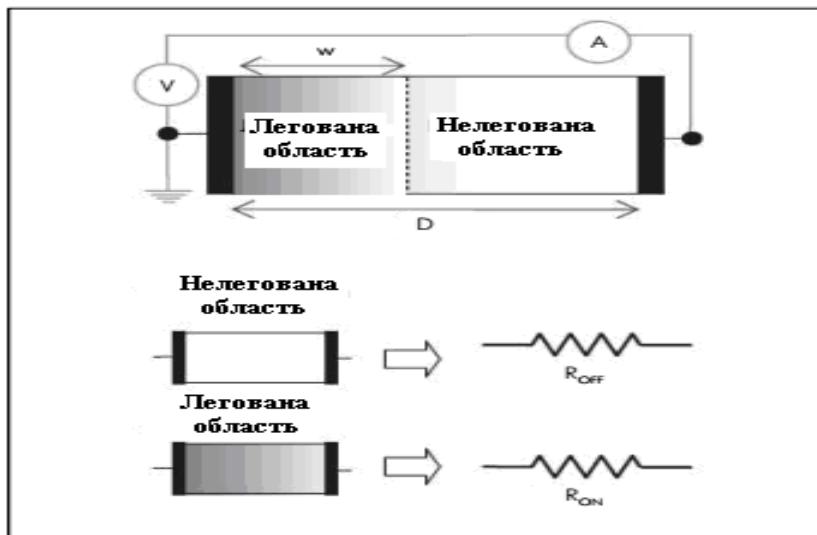


Рис.3.2. Структура мемристора.

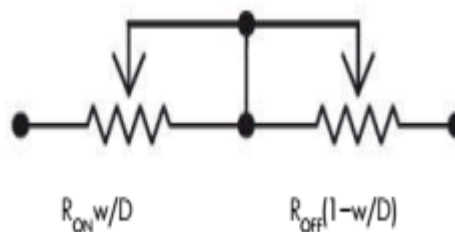


Рис.3.3. Еквівалентний ланцюг мемристора.

З одного боку шару знаходиться легуюча домішка (позитивні іони) - в області ширини w .

На рис.3.4 приведена вольт-амперна залежність роботи мемристорної схеми пам'яті. Як видно із рисунка в діапазоні напруг від 0,5 В відбувається зчитування інформації. Запис даних в комірку пам'яті проводиться при напрузі 1,5-2 В. На рис.3.5 наведена схема залежності опору від висоти при формуванні мемристорних наноструктур.

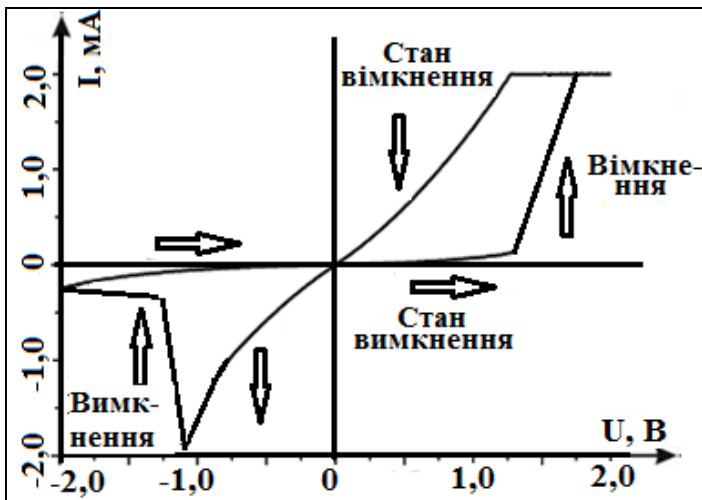


Рис.3.4. Вольт-амперна залежність роботи мемристорної схеми пам'яті.

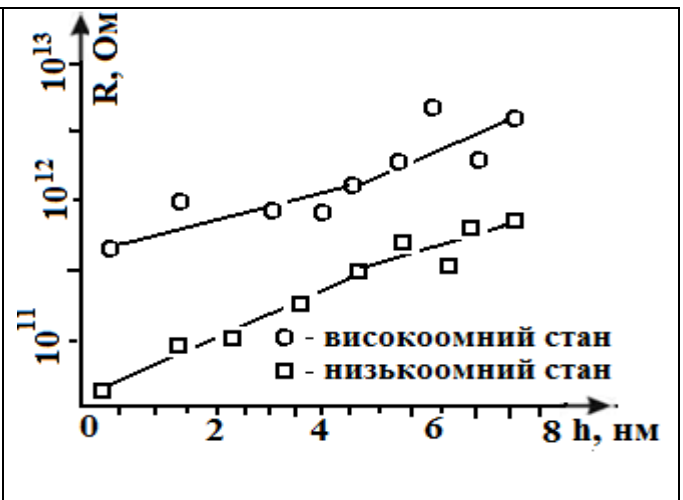


Рис.3.5. Схема залежності опору від висоти при формуванні мемристорних наноструктур.

Якщо розглядати ситуацію з точки зору цифрової електроніки, то можна сказати, що мемристор переходить зі стану "0" в стан "1" і навпаки. Причому цей стан мемристор "запам'ятовує" і може зберігати практично необмежено довго - і для цього йому не потрібно джерело напруги. Досягнутий на сьогоднішній день час перемикання мемристора з одного стану в інший складає близько 1 нс. Подібна поведінка мемристора дозволяє використовувати його в якості біполярного перемикача: при подачі напруги протилежної полярності мемристор замикає або розмикає ланцюг, що проходить через нього.

Описані властивості [В.1] мемристора дають можливість застосовувати його відразу в декількох «іпостасях»: перемикача, елемента пам'яті і складовою логічного елемента. Уже створені прототипи пристроїв, які реалізують такі застосування. Вони засновані на архітектурі, яка отримала назву "кросбари".

3.3. Вивчення мемристора як двополюсника з нелінійною вольтамперною ха-рактеристикою, що має гістерезис.

Мемристор може бути описаний як двополюсник з нелінійною вольт-амперною характеристикою, що має гістерезис. Це окремий елемент електричної схеми, що містить початково два виходи. При підключенні до електричної батареї через мемристор протікає електричний струм. Величина струму змінюється в часі, в тому числі і в залежності від прикладеної напруги батареї. Для відновлення властивостей пам'яті мемристора необхідно міняти полярність підключення батареї.

Тобто, принципова відмінність мемристора від більшості типів сучасної напівпровідникової пам'яті і його головна перевага перед ними полягають в тому, що він не зберігає свої властивості у вигляді заряду. Це означає, що йому не страшні витік заряду, з якими доводиться боротися при переході на мікросхеми нанометрових масштабів, оскільки він повністю енергонезалежний. Простіше кажучи, дані можуть зберігатися в мемристорі до тих пір, поки існують матеріали, з яких він виготовлений. Для порівняння: флеш-пам'ять починає втрачати записану інформацію вже після року зберігання без доступу до електричного струму. Комп'ютер з мемристорною пам'яттю може не тільки споживати в десятки разів менше електроенергії, але при цьому ще й обходитися без перезавантажень - при вимкненнях / включеннях завжди запам'ятовуючи і повертаючи свій останній робочий стан.

Слід зазначити суттєві відмінності між тим мемристором, який був описаний в [3.1] і тим пристроєм, який було описано в [В.1]. Гіпотетичний мемристор [3.1] в теорії не має ніякої матеріальної пам'яті, а робота його заснована на магнітному потоці. Однак наноконструкція, виявлена в [В.1], фактично являє собою аналоговий пристрій, який взагалі не вимагає для своєї роботи ефектів магнетизму. Як результат, тепер мемристором називають все, що проявляє в роботі мемристивні властивості.

3.4. Використання особливостей роботи мемристора на нанорівні при дії кисневих вакансій.

Вперше отриманий експериментально мемристор за допомогою нанотехнологій був описаний в [В.1]. Такий мемристор був виготовлений з відпаленого TiO_2 . Відпал

являє собою процес різкого нагріву матеріалу, як правило, для зміни аморфного стану матеріалу в кристалічний. В даному випадку відпал використовується для створення кисневих вакансій. Кисневі вакансії мають основоположне значення для функціонування мемристора. Рівняння (3.2) і (3.3) описують ідеальний мемристор і створену ідеальну математичну модель.

Напруга на виводах і струм через пристрої задаються змінними $v(t)$ та $i(t)$. Товщина TiO_2 є постійною і задається величиною D . Товщина шару, насичена кисневими вакансіями, які проявляють провідність описується функцією $w(t)$. Найнижчі і найвищі значення опору, які може досягати мемристор - R_{ON} та R_{OFF} відповідно. Рухливість кисневих вакансій представлена в μv і повинна бути $10 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

На рис. 3.6 представлено принцип дії вказаних рівнянь. Легована область відповідає відпаленому шару TiO_2 , а нелегована область представляє собою частину TiO_2 , яка була надто глибоко і процес відпалу не надав на неї впливу. Якщо позитивна напруга подається з легованого боку, то вакансії, будучи позитивно зарядженими, будуть відштовхуватись і рухатися до нелегрованої області, обмеженою рухливістю кисневих вакансій. В підсумку w , стане рівною D , що приведе до стану ON, як показано на рис.3.6. Якщо напруга змінюється в протилежний бік, то кисневі вакансії будуть зміщені в початковий стан, що в свою чергу змінить w до 0, а значить, мемристор буде знаходитися в відключеному стані, оскільки вакансії повністю будуть зміщені і будуть знаходитися на одній стороні оксидного шару. Така поведінка показує, що w не може бути більшим, ніж D або менше 0. Рівняння (3.1) та (3.2) не мають певних граничних умов.

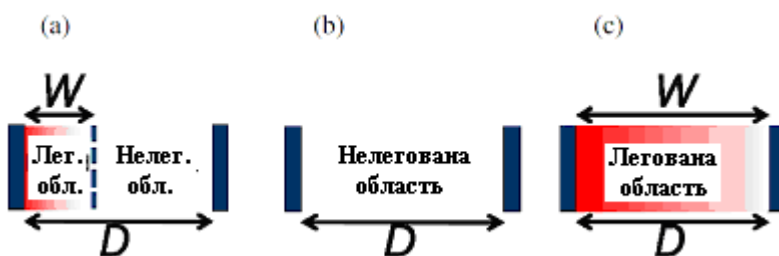


Рис. 3.6. Поведінка ідеального мемристора: а - операції між перемиканням, b - стан OFF, c - стан ON [2.6].

Існують два способи резистивного перемикання пам'яті шляхом катіонної / аніонної міграції або з утворенням провідного каналу. Виявлено, що перехід в стан ON обмежується провідним каналом, а не розповсюдженням по всьому контакту [2.8]. Така поведінка дозволяє повністю не залежати від розміру контакту.

3.5. Методи та матеріали для виготовлення мемристорів.

Мемристор може бути виготовлений з будь-якої сендвіч-структури метал-діелектрик-метал, з біполярною характеристикою перемикання. На кінцевий результат мемристивної поведінки впливає безліч параметрів, зокрема матеріали, з яких виготовляється пристрій, а також методи синтезу мемристорів. В даний час існує декілька найвідоміших способів виготовлення мемристорів.

Найбільш широко використовуваними методами є нанодруківана літографія [2.2, 2.3] і атомно-шарове осадження [1.10, 2.4], а також імпульсне лазерне осадження [30]. Обидва ці процеси вимагають стадій відпалу при високій температурі та формуючої напруги [2.4, 2.6, 2.7, 3.3].

В роботі [2.7] досліджено можливість використання органічного моношару як перемикача середовища для реалізації мемристора. Два пристрої виготовлені з використанням послідовного осадження титану з подальшим нанесенням органічної плівки Ленгмюра-Блоджетт і верхнього контакту з платини. Пристрої були виготовлені на кремнієвих пластинах із товщиною оксидної плівки 200 нм. Експериментально відзначено, що будь-які напруги між -2В і +1В приводять до експоненціального відношення ВАХ, і як правило, пов'язані з прямим тунелюванням через плівку 2,5 нм. При збільшенні напруги фіксується незворотний перехід в біполярний стан перемикання. Такий процес був названий «формуванням» і перемикаюча поведінка мемристорів відбувалась після стадії формування. Всі три моношари Ленгмюра-Блоджетт проявляють мемристичні ВАХ з гістерезисом.

Механізм перемикання опору в тонкій плівці TiO_2 , вирощеної методом атомно-пошарового осадження описується в [2.4]. Плівки були отримані з використанням $\text{Ti}(\text{OC}_3\text{H}_7)_4$ і O_2 в якості окислювача. $\text{Ru} / \text{SiO}_2 / \text{Si}$ пластини відпалювали при 250°C , а товщина плівки TiO_2 регулювалася в межах від 20 нм до 57 нм шляхом додавання циклів осадження. Вирощені плівки мали полікристалічну мікроструктуру рутилу.

Платина і алюміній осаджувалися електронно-променевим випаровуванням і використовувалися в якості верхніх електродів діаметром 300 мм. Дані зразки спочатку мали опір 10^9 Ом в інтервалі від - 1 В до + 1 В. Для того, щоб знизити опір і забезпечити перемикання, напругу збільшували до 2,2 В для 57 нм плівки з необхідним обмеженням струму для м'якого пробою. На даному етапі обмеження струму є надзвичайно важливим, оскільки струм в області 70 мА може викликати жорсткий пробій і знищити пристрій. Після такого етапу формування, плівка, як при негативній, так і при позитивній напрузі залишається в стані ON. Збільшення напруги зміщення приводить до збільшення щільності струму до певного моменту, після чого щільність струму різко падає до дуже низького значення при пороговій величині напруги, що, в свою чергу, переводить мемристор в стан OFF. Це перемикання відбувається при обох полярностях і подальше збільшення напруги зсуву вище 1,5 В переводить мемристор в стан ON. До тих пір, поки напруга зсуву обмежена нижче порогових значень, перемикання станів ON і OFF в режимі читання відбувається протягом декількох сотень разів [2.7].

В роботі [3.4] описано отримання на основі діоксиду титану (TiO_2) - напівпровідника, який в чистому вигляді має великий опір. Однак якщо TiO_2 легується іншими елементами, то ці легуючі домішки (наприклад, іони кисню) в високому електричному полі можуть дрейфувати в напрямку електричного струму. Подача напруги зсуву через тонку плівку діоксиду титану змушує домішки поширюватися в обсязі TiO_2 і таким чином знижує його опір.

Подача струму в іншому напрямку переміщує домішки назад, збільшуючи опір TiO_2 . Мемристор може приймати не тільки два положення - 0 або 1, а й будь-які інші значення, працюючи в аналоговому режимі. Причому це робиться на одному елементі, що дозволяє зменшити розміри мемристора до декількох нанометрів, а швидкість спрацьовування - до наносекунд. Для встановлення мемристорів на підкладку були нанесені поперечні провідні доріжки, на які було нанесено шар діоксиду титану (TiO_2) товщиною 15 нм. Поверх нього були нанесені поздовжні провідні доріжки. У місцях перетину доріжок отримано виражений мемристивний ефект зниження опору.

Ще одна технологія виготовлення напівпровідникових структур - епітаксіальна технологія, яка включає в себе процес утворення «дірок» у валентній зоні кристалічної решітки. Причому, як р-типу, так і n-типу. Так, наприклад, в якості основного матеріалу першого шару кристалічної структури мемристора використовується діоксид титану TiO_2 . Як легуючий елемент другого шару використаний чистий титан. При осадженні діоксиду титану і нагріванні до 2200°C суміш $\text{Ti} + \text{TiO}_2$ створює шар, збіднений киснем. У кристалічній структурі pojawiaються іони титану з вільними електронними зв'язками. Ці відкриті зв'язки змінюють електричний опір ланцюга мемристора в залежності від струму і часу його протікання. Гістерезис тут має струмовий характер. Для повернення мемристора в початковий стан необхідно поміняти полярність напруги на виводах мемристора і пропустити струм [В.1].

Перераховані методи вимагають дорогого устаткування і декількох етапів виготовлення, включаючи стадії високотемпературного відпалу і «формуючої» стадії. Виходячи з літературних даних, очевидно, що економічно вигідно використовувати інший метод створення мемристорів, такий як анодне оксидування [3.2].

3.6. Дослідження самовпорядкованих нанотубулярних оксидних шарів.

Оксидування - процес отримання на поверхні металу штучної плівки, що складається в основному з оксидів оброблюваного металу [3.5]. Шляхом анодного окислення металевого титану в присутності розчиняючого електроліту синтезуються плівки діоксиду титану. Такі плівки складаються з нанотрубок діоксиду титану, орієнтованих перпендикулярно металевій підкладці. Діаметр цих трубок можна варіювати в межах декількох десятків нанометрів в залежності від параметрів окислення.

В [3.6] описано створення нанотрубок за допомогою анодного окислення в електроліті, що містить фтористий водень. В роботі [3.7] представлений процес отримання нанотубулярних структур TiO_2 . Попередньо зразок (Ti-фольга) очищається, а потім анодується при потенціостатичному режимі 25 В протягом 6 хв в електроліті (рН 4,7), що складається з безводного KF , $\text{NaHSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ і $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. В результаті отримано масив упорядкованого каналного анодного оксиду титану (рис. 3.7).

Варіювання товщини оксидного шару можна досягти за рахунок контролю рН протягом всього процесу окислення. В результаті зниження локальних флуктуацій

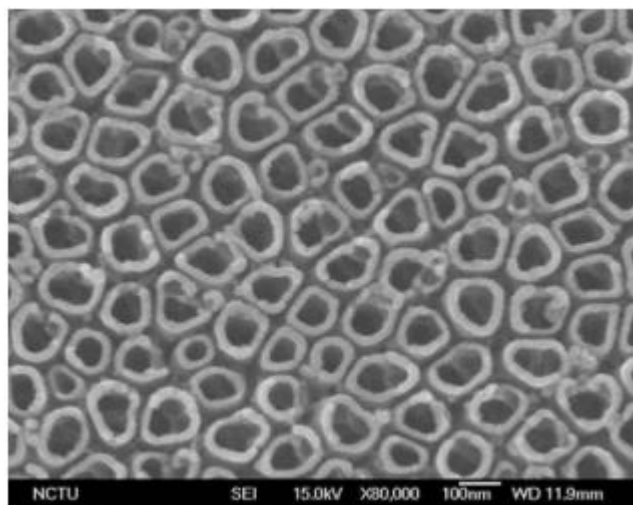


Рис.3.7. РЕМ-зображення нанотрубок TiO_2 [3.8].

рН вдалося виростити плівки товщиною до 7 мкм, що складаються з нанотрубок з гладкими стінками діаметром 65 нм [3.8]. Структура і морфологія нанотубулярного шару діоксиду титану, отриманого анодуванням металевого титану, залежить від безлічі параметрів, таких як склад металевої підкладки і якість поверхні; склад електроліту; режим електролізу та напруги; струм анодування; час анодування; робоча температура. Для того щоб визначати вплив параметрів анодування на структуру пористої титанової плівки, необхідно розуміти структуру і механізм утворення пористого оксидного шару.

Відповідно до теорії утворення анодного оксиду можна говорити про те, що анодні оксиди складаються з двох шарів: прилеглого до металу суцільного тонкого бар'єрного шару і зовнішнього пористого шару. На цій основі було створено фізико-геометричні уявлення (рис. 3.8) про ідеальну модель пористої анодної плівки. В роботі [3.9] наведено наступний механізм росту упорядкованого шару нанотрубок (НТ). Формування впорядкованої плівки в основному диктується розподілом потенціалу на поверхні титану. Суміжні пори, як правило, розширюються одночасно, поки електропровідна фаза титану між ними не окислиться. Після того, як титан окислиться, збільшується товщина оксиду і сила електричного поля в

бар'єрному шарі різко падає, що призводить до зменшення швидкості міграції іонів кисню через плівку.

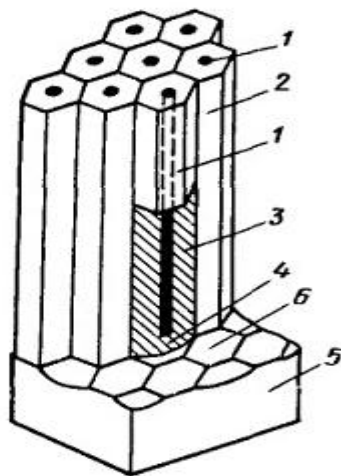


Рис.3.8. Модель будови анодних плівок [3.9]: 1 - пора; 2 - оксидний осередок; 3 - стінка оксидного осередку; 4 - безпористий оксидний шар бар'єрного типу; 5 – анодуючий метал; 6 - відбитки основ оксидних осередків на поверхні анодуючого металу.

З іншого боку, оскільки дифузія O_2 практично рівна у всіх порах, структура має тенденцію до утворення просторово упорядкованого масиву з максимальною щільністю упаковки. Форма нанотрубок є наслідком природи процесу окислення: міграція кисню з внутрішньої порожнини трубки до металевої поверхні відбувається ізотропно в усіх напрямках до низхідної півсфери, а інтерфейс оксид/метал поступово зміщується в титанову фольгу.

Поперечний переріз масиву нанотрубок в площині оксидної плівки відображає топологію інтерфейсу оксид/метал з періодичною гексагональною упаковкою порожнин. Припускаючи, що окислений профіль є однорідним в двох сусідніх порах, тобто є наближеним до двох зростаючих циліндрів, можна вважати площину структури між ними симетричною. Відповідно до геометрії речовини, дзеркальна площина відповідає мінімальній концентрації іонів кисню і максимальній щільності дефектів. Для періодичних анодних титанових плівок ці площини між сусідніми нанотрубками формують гексагональну пористу структуру. При анодуванні титану, оксиди, що утворюються (з проміжними окисленими станами) можуть бути хімічно

розчинені в розчині фториду, що призводить до утворення масивів нанотрубок, де товщина стінки трубки визначається товщиною шару TiO_2 , а міжтрубна відстань по товщині шару, що містить проміжні продукти окислення [3.10] .

Оскільки концентрація кисневих вакансій впливає на поведінку мемристора, в роботі [3.11] досліджувались структури на основі TiO_2 з різною концентрацією кисневих вакансій, а саме 10, 20 і 30% і експериментально було показано найкращий прояв мемристорних властивостей при концентрації кисневих вакансій 20%, при цьому відношення $R_{\text{HRS}} / R_{\text{LRS}} \approx 9$. Високе відношення опорів проявляється в структурі $\text{Pt} / \text{TiO}_2 / \text{Pt}$ і дорівнює близько 10^3 . Структура анодного оксиду титану складається з двох частин - пористого оксидного шару і бар'єрного шару між пористою плівкою і металеву поверхнею (рис.3.9).

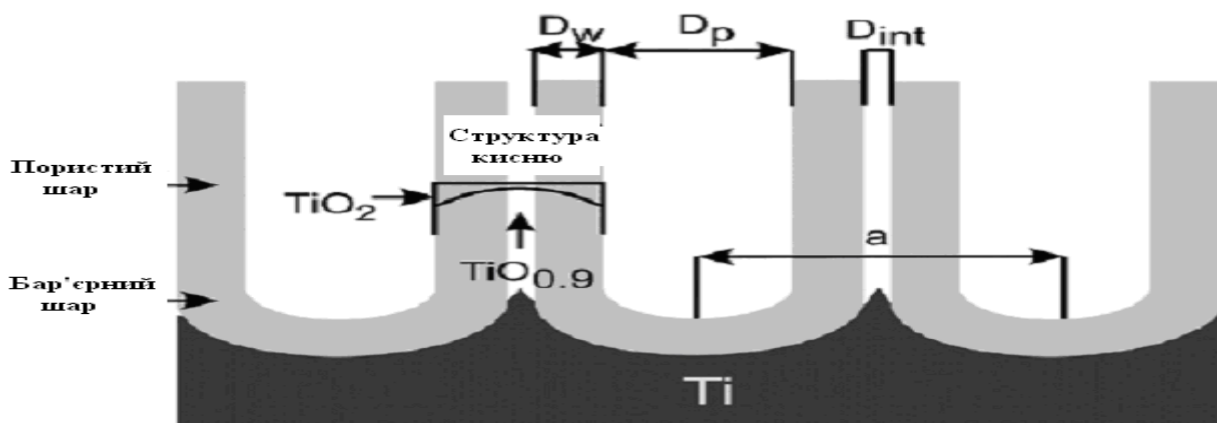


Рис.3.9. Схема анодованої плівки TiO_2 [3.10].

Товщина оксидного шару може дорівнювати 100 нм [3.12]. Також високе відношення проявляється і з використанням срібних електродів в структурі $\text{Ag} / \text{TiO}_2 / \text{Ag}$ [3.13], яке дорівнювало близько 10^3 , причому структура була працездатною протягом 100 циклів перемикавання.

3.7. Використання мемристивності при моделюванні нелінійних систем у вигляді синапсів і нейронів.

Відкриття мемристорів привело до створення нових пристроїв. Перше застосування - використання мемристора як незалежної пам'яті. В роботі [3.14] на основі аморфного кремнію описано мемристор, здатний зберігати 1 кілобайт даних. Щільність пам'яті становить 2 Гбіт/см^2 , а ширина ліній контактів 120 нм. Вихід та-

кого мемристора становить 98%. Пристрої Ag / n-Si / p-Si, показали перемикання для більш ніж 10^5 циклів. Кожен біт був записаний під час подачі імпульсу 5,5 В. Поняття мемристивності показало ефективність при моделюванні нелінійних систем.

В [В.3] описані підходи до механізму роботи мозку таким чином, що робота нашої пам'яті визначається саме тим, які нейрони мозку пов'язані один з одним і наскільки ці зв'язки сильні. Відповідно, процес запам'ятовування трактується як зміна сили цих зв'язків під дією відчуттів, що породжують сигнали в нейронній мережі мозку. Побачивши аналогію для даних процесів в роботі свого пристрою, в [3.15] припустили, що можна спробувати скопіювати структуру мозку, побудувавши нейрони з транзисторів, а синапси замінити мемристорами.

Аналогію роботи мемристора до нейрона можна пояснити так: швидкість передачі по сигналу залежить від часу активації нейронів - чим менше часовий проміжок між активаціями, тим швидше передається сигнал по синапсу. Точно так само працює і масив мемристорів: при подачі струму з інтервалами 20 мс опір мемристора вдвічі менше, ніж при інтервалах 40 мс. Напруга на виводах і струм через пристрій задаються змінними $v(t)$ та $i(t)$. Товщина TiO_2 є постійною і задається величиною D . Товщина шару, насичена кисневими вакансіями, які проявляють провідність описується функцією $w(t)$. Найнижчі і найвищі значення опору, які може досягати мемристор - R_{ON} та R_{OFF} відповідно (рис.3.6).

В [В.1] було показано, що пристрій мемристорних структур, а саме - тонких плівок TiO_2 (TiO_x) в сендвіч -структурі між двома платиновими контактами - виразно нагадує функціонування синапсів - тобто точок контакту між нервовими клітинами у живих організмів взагалі і в мозку зокрема. Такий пристрій показує резистивне перемикання структури в залежності від прикладеної напруги. При цьому були отримані зразки осередків зі стороною 3 нм і швидкістю перемикання близько однієї наносекунди. Також був побудований з таких осередків компактний 3D-масив на чіпі, здатний виконувати логічні операції і працювати аналогічно синапсам, тобто міжз'єднанням між нейронами в людському мозку. Одночасно і незалежно від цих експериментів [В.1,В.2], в ряді дослідницьких центрів розвиток мемристорів набув подальшого розвитку. Зокрема - до переносу ідеї «резистора з пам'яттю» на «кон-

денсатор з пам'яттю» (мем-ємність) і «індуктивність з пам'яттю» (мем-індуктор). Звівши всі ці речі в єдину концепцію мемелементів, в роботі [3.16] зуміли вибудувати модель принципово нового обчислювача – мемкомп'ютера, якому вже не потрібні «транзистори-нейрони», але за багатьма характерними рисами дивно схожого на роботу біологічних систем і мозку, зокрема.

На сьогоднішній день вже цілком ясно, що відкриття мемристорів [В.1] допомогло об'єднати кілька різних областей - системи резистивної RAM, мемристори і фізику гранульованих середовищ, а також дало початок істотно новій дисципліні в інформатиці, що отримала назву «мемкомп'ютинг» [3.16]. Суть цього нового підходу зводиться до того, що відкриті нині компоненти схем з пам'яттю, або «мем-елементи» (мемристори, мем-ємності і мем-індуктори), здатні самі виконувати одночасно як обробку, так і зберігання інформації.

В умовах такої платформи, яка об'єднує в своїх елементах процесори і всі види пам'яті, повний цикл роботи з початковими, проміжними і фінальними даними відбувається швидко і паралельно в одному і тому ж місці. Розробники мемкомп'ютерного напрямку особливо відзначають, що стан мемелементів підлаштовується під вхідні сигнали і забезпечує аналогові можливості, недоступні в стандартних елементах електроніки. А це призводить до адаптивної схемотехніки, забезпечуючи ефективну аналогію для масивно-паралельних обчислень. Можна сказати, що всі ці особливості нової технології різночасно схожі на функціонування живих біосистем.

Причому обов'язково треба відзначити важливий факт: всі ці нові елементи електронної схемотехніки, як з'ясувалося, виникають в системах природним чином - коли технологія поглиблюється до рівня наномасштабів і починає працювати з молекулярною та гранульованою структурами матеріалів. Іншими словами, мемелементи виявляються природним продуктом безперервної мініатюризації електронних пристроїв.

В [3.15] розглянута гібридна мікросхема: чіп являє собою матрицю з 42 провідників діаметром 40 нм, 21 з яких натягнуті паралельно один одному, а інші 21 - перпендикулярно їм. Шар діоксиду титану товщиною 20 нм розташований між вза-

ємно перпендикулярними провідниками, і в цих місцях формуються мемристори. Навколо цієї «сітки» розташований масив польових транзисторів, підключених до виходів мемристорів. Польові транзистори забезпечують зміну полярності напруги на мемристорах схеми пам'яті. А це вже масив керування мемристорною пам'яттю. На основі мемристорів можна створювати комп'ютери принципово нової архітектури, які по продуктивності значно перевищують напівпровідникові [3.17]. Сучасні комп'ютери побудовані на базі архітектури фон Неймана: і дані, і програми зберігаються в пам'яті машини в двійковому коді, причому обчислювальний модуль відділений від пристроїв зберігання, а програми виконуються послідовно, одна за одною. Прогресивна в середині минулого століття, така архітектура сьогодні вже не відповідає вимогам, що пред'являються до комп'ютерної техніки: програми стали набагато складнішими, а обсяги оброблюваних даних виросли на порядки, а то й в десятки порядків.

У комп'ютері на мемристорах паралельно і незалежно один від одного працюють безліч модулів, а можливість запам'ятовувати і оперувати необмеженою множиною значень від 0 до 1 означає, що виконувані програми не обмежені двійковим кодом. Більш того, стануть в принципі непотрібними окремі апаратні компоненти комп'ютера - процесори, відеочіпи, пам'ять і жорсткі диски; машина буде архітектурно однорідним пристроєм, де одночасно будуть зберігатися всі дані і проводитися всі операції з ними. Для апгрейда достатньо буде встановити додаткові мемристорні модулі, а для ремонту - замінити ті, що вийшли з ладу. Мемристорний комп'ютер не треба буде "завантажувати": відразу після включення він буде готовий продовжити роботу, причому з того самого місця, на якому вона була перервана. У порівнянні з сучасною технікою, енергоспоживання мемристорних машин буде незначним, а обчислювальна потужність просто гігантською. З огляду на те, що до серійного виробництва мемристорів залишився буквально один крок, дуже може бути, що саме мемристорний комп'ютер стане проміжним ступенем на шляху до квантового комп'ютера. Якщо ж використовувати достатню кількість мемристорів, то теоретично можливо створити діючу модель мозку - і не просто з можливістю обчислень, але і з функцією самонавчання [3.17].

Для проведення процесу формування нанотубулярного шару діоксиду титану може бути використана установка [3.4], що складається з електрохімічної комірки (рис. 3.10), термостата і джерела живлення. У електрохімічний осередок поміщається анодований зразок і електроліт. Термостат підтримує постійну температуру, яка задається користувачем, а джерело живлення забезпечує підтримку заданого струму або напруги в електрохімічному осередку.

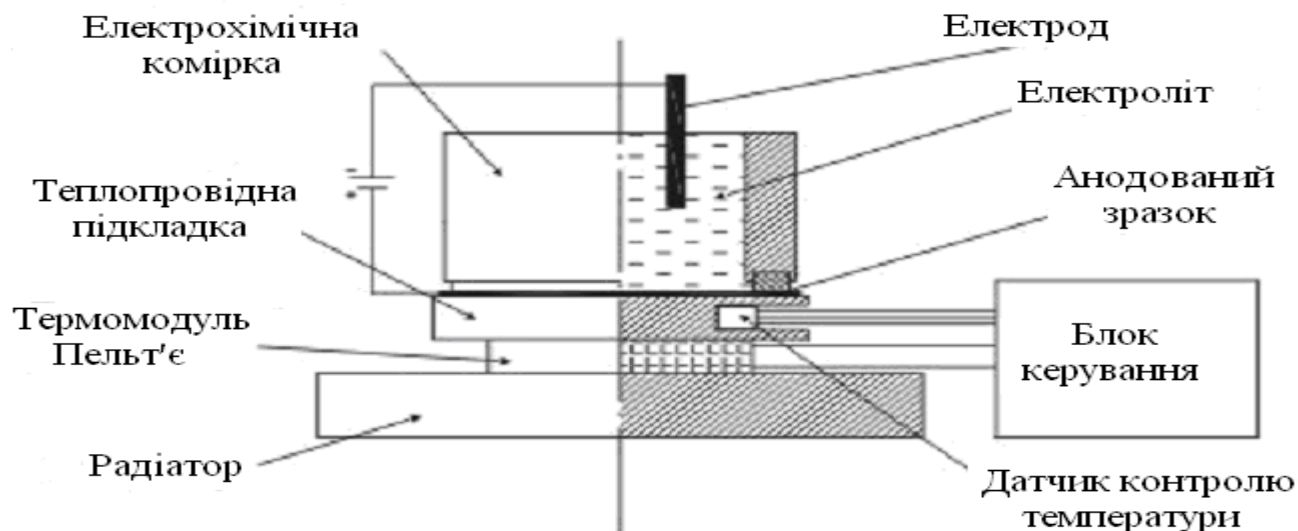


Рис.3.10. Блок-схема конструкції охолоджуваної електрохімічної комірки.

Керування здійснюється через спеціальне ПЗ, написане в програмному середовищі LabView. У робочому вікні програми є можливість задавати час, задавати режим анодування (потенціостатичний або гальваностатичний), змінювати значення напруги (струму) і спостерігати їх в реальному часі із записом в текстовий файл. Джерело живлення дозволяє задавати напругу до 140 В і струм до 1,1 А. Термостат дозволяє підтримувати температуру в електрохімічній комірці від 0°C. Охолодження реалізується за допомогою ефекту Пельтьє, використовуваного в конструкції електрохімічної комірки (рис.3.10). Система електрохімічної установки забезпечує охолодження і стабілізацію температури безпосередньо в зоні електрохімічної реакції, оскільки охолоджуваний елемент знаходиться в безпосередньому контакті з окислюваною підкладкою. Тісний контакт між підкладкою і термостабілізованим елементом забезпечує постійність температури бар'єрного оксиду і електроліту.

Для отримання зразків з метою дослідження впливу товщини оксидного шару анодування здійснювалося в розчині етиленгліколю (50 об.%), гліцерину (45 об.%) та води (H_2O , 5 об.%) з додаванням 0,5 г фториду амонію в потенціостатичному режимі при напрузі 10 В. Час анодування варіювався від 5 до 20 хвилин з інтервалом в п'ять хвилин. Зі збільшенням часу анодування, товщина шару зростала до певного моменту (рис.3.11) [3.4].

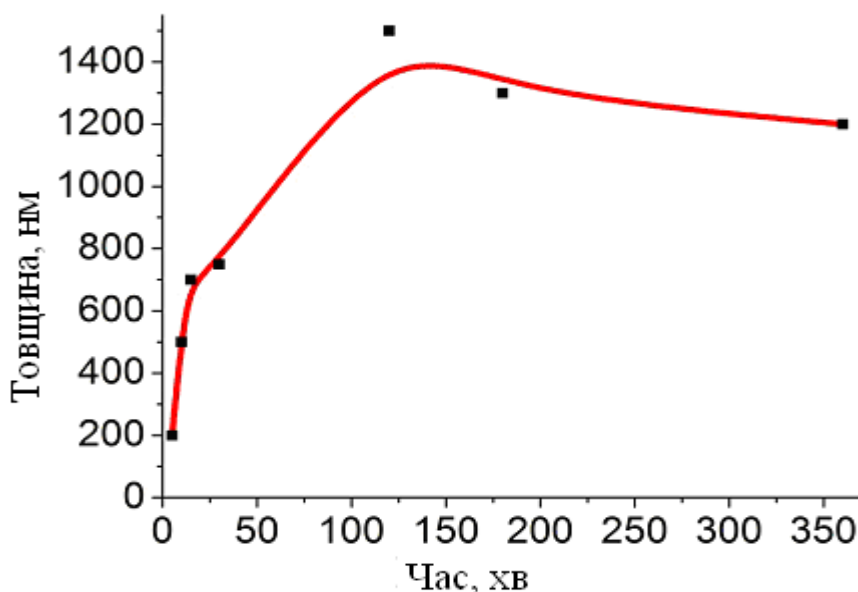


Рис.3.11. Вплив часу анодування на товщину оксидного шару.

При електрохімічному формуванні нанотрубок діоксиду титану потенціал аноду прикладається до анодованого зразка (титанова фольга), а в якості катоду використовують електроди з різних матеріалів, інертних до середовища, в якому відбувається формування оксиду (нержавіюча сталь). Зразки нанотубулярного діоксиду титану можуть мати різну морфологію в залежності від завдань дослідження. Для цього застосовувалися різні параметри анодування, такі як тип електроліту, режим анодування, час процесу, а також напруга. Єдиними для всіх зразків параметрами залишалися використовуваний матеріал для анодування - титанова фольга марки BT1-0 товщиною 150 мкм і температура - 20°C.

Для напилення золотих і срібних контактів на отримані зразки Ti/TiO_2 використовувалася вакуумна установка магнетронного напилення. Для процесу напилення до попередньо отриманого нанотубулярного шару діоксиду титану виконувалися 2 різні трафарети напилення для створення верхніх електродів різних діаметрів.

Для отримання золотих контактів діаметром 5,5 мм виготовлявся паперовий трафарет ручним способом. Для створення золотих мікроконтактів діаметром 100 мкм прикріплювалася сітка з круглими отворами. Після закінчення процесу напилення контакти мали товщину металевого шару близько 300 нм і 100 нм відповідно.

3.8. Дослідження процесів резистивного перемикавання в сендвіч-структурах Ti / TiO₂-HT / Me.

Вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) для виготовлених структур Ti / TiO₂-HT / Au з розміром контактної площадки золота $\approx 5,5$ мм проводили з використанням програмованого модульного джерела живлення PXI-4130 [3.4]. На електричні контакти (Au - «фаза», Ti - «нуль») подавалася гармонійна напруга амплітудою $U = 1,5$ В. Отримані ВАХ вказують на прояв мемристивних властивостей досліджуваної структури. При негативній полярності і величині $U > 1,0$ В досліджувана структура перемикається в низькоомний стан (LRS - low resistance state).

При цьому реєструється горизонтальна ділянка ВАХ, пов'язана з апаратним обмеженням струму, що протікає на рівні $I = -200$ мА. Подальша зміна амплітуди і полярності прикладеної напруги приводить до переходу в високоомний стан (HRS - high resistance state) також при $U > 1,0$ В. При цьому $I < 200$ мА. Визначено значення опорів в низько- (RLRS ≈ 3 Ом) і високоомному (RHRS ≈ 180 Ом) станах. Таким чином, відношення RHRS / RLRS ≈ 58 .

В ході проведених досліджень можна зробити висновок про вплив розміру верхнього електрода на вольт-амперні характеристики мемристора. При зменшенні діаметра контакту в ≈ 55 раз струм електроформування знижується в 40 разів без втрати мемристивних властивостей зразка. Відношення опорів зменшилося приблизно на 17, але при цьому залишилося також досить високим для функціонування зразка в якості мемристивного елемента. Для всіх сендвіч-структур Ti / TiO₂ / Au характерно біполярне резистивне перемикавання.

Найбільш оптимальні значення співвідношення RHRS / RLRS ≈ 186 -134 для зразка товщиною шару 160 нм, оскільки його ВАХ більш стабільні, працюють близько 20 циклів [3.4]. Можна зробити висновок про перспективність використання

вказаних зразків в якості функціонального середовища для елементів незалежної пам'яті. Експериментальним шляхом було також визначено, що при зменшенні товщини оксидного шару струм електроформування зменшується в 10^3 разів [3.4]. Наприклад, для оксидного шару завтовшки 200 нм струм електроформування становить 10 мА, при зменшенні товщини шару до 60 нм струм знижується до 10 мкА.

Виходячи з літературних даних [3.18] ясно, що на електричні характеристики впливає склад і морфологія мемристора в загальному, а також матеріал електродів, зокрема. У зв'язку з цим можна досліджувати вплив золотих і срібних контактів, товщиною 100 нм, напилених на структуру Ti / TiO₂. Як очікувалося, електричні параметри отриманих зразків Ti / TiO₂ / Au і Ti / TiO₂ / Ag відрізняються один від одного. Відомо, що при роботі виходу металу, більшою, ніж робота виходу напівпровідника, структура матиме випрямляючі властивості ВАХ, тобто спостерігається бар'єр Шотткі. В іншому випадку контакт буде проявляти невикривляючі (омічні) властивості.

При дослідженні процесу імітації режимів перемикання мемристора виконувалися вимірювання в імпульсному режимі в автоматизованому середовищі LabVIEW. Розроблений віртуальний прилад дозволяє тестувати структури шляхом почергової генерації імпульсів читання і запису. За попередньо встановленими параметрами імпульсів читання і запису (амплітуда, максимальний струм, тривалість і число імпульсів) відбувається генерація першого негативного імпульсу запису (Write «1»). Даний імпульс здійснює електроформування структури мемристора і переводить її в низькоомний стан. Потім йде генерація імпульсів читання (Read) з меншою амплітудою для визначення поточного стану структури по її електричному опору. Після чого генерується позитивний імпульс запису (Write «0») для переведення мемристора з LRS в високоомний стан (HRS) і відбувається процедура Read.

Цикл Write «1» → Read → Write «0» → Read повторюється користувачем задане число раз. Для здійснення процесу переведення мемристора з HRS в LRS стани досліджуваної структури подається одиночний негативний імпульс U до 3 В і $\tau = 100$ мс, з LRS в HRS (режим Write «0») подавався одиночний позитивний імпульс U

до 4 В і $\tau = 100$ мс, а для визначення поточного стану (режим Read) серія з 2 повторних позитивних і негативних імпульсів $U = 0,1$ В і $\tau = 10$ мс.

В [3.4] для мемристора $\text{Ti/TiO}_2/\text{Au}$ визначені оптимальні значення напруги, а саме: $U_1 = 2$ В і $U_2 = 3$ В. При даних значеннях напруги досліджувана структура проявляє мемристивні властивості. Було проведено дослідження впливу обмеження струму на значення відношень опорів в високоомному і низькоомному станах $R = R_{\text{HRS}} / R_{\text{LRS}}$ з метою виявлення максимально можливого значення R . Перед вимірюванням ВАХ проводилася процедура електроформування кожного мемристора позитивною напругою до 3 В. При вимірах струм обмежували на рівні 5 і 10 мА.

Вимірювання в імпульсному режимі можна виконувати після процедури електроформування позитивною напругою до + 4 В при обмеженні струму $I = 10$ мкА. В імпульсному режимі позитивний імпульс напругою $U = + 3$ В тривалістю 100 мс при обмеженні струму 10 мкА переводить структуру в низькоомний стан, після чого слідує імпульс читання тривалістю 10 мс при напрузі $U = 100$ мВ [3.4]. Потім подається негативний імпульс напругою $U = - 1$ В тривалістю 100 мс при незмінному обмеженні струму. Даний імпульс переводить структуру з низькоомного стану в високоомне. Структура залишається працездатною досить довгий час - $34 \cdot 10^3$ перемикань, після чого структура переходять в низькоомний стан і перемикання більше не відбувається.

3.9. Побудова запам'ятовуючої матриці на основі мемристорних наноелектронних структур.

Структури, що проявляють мемристорний ефект, мають малі розміри (порядку декількох нанометрів), мають низьку споживану енергію (одиниці пікоджоулів). Використання мемристорів як елементів надвеликих інтегральних схем незалежної резистивної пам'яті з довільним доступом дозволить значно підвищити швидкодію і знизити споживану потужність обчислювальних пристроїв, які використовують даний вид пам'яті. Опір мемристора, як двополюсника змінюється в залежності від загальної величини заряду, що проходить через елемент. Крім цього, мемристор зберігає свій стан при вимкненні живлення. Програмування наномемристора може

виконуватись засобами гібридної схеми, що забезпечує його функціонування в режимах логічного елемента та запам'ятовуючого пристрою. Електричні характеристики мемристора визначаються передісторією його функціонування, що схоже на властивості синапсу біологічних нейронних систем.

Для визначення основних параметрів при реалізації запам'ятовуючих матриць мемристорної пам'яті були досліджені відомі зразки вказаної пам'яті. В запам'ятовуючій структурі мемристорної пам'яті на основі нанотранзисторів [3.19] була використана напівпровідникова підкладка з областями стоку і витоку на ній. Між останніми формувався канал провідності, а затвор складався з запам'ятовуючого шару і верхнього контактного електрода. Робота такої пам'яті заснована на перерозподілі кисневих вакансій в запам'ятовуючому шарі під дією електричного поля.

Технологічний процес формування запам'ятовуючого шару включає проведення високоточних операцій осадження двох шарів оксиду металу з різною концентрацією кисневих вакансій. При цьому необхідна велика займана елементом площа внаслідок використання латерально розташованого каналу провідності та областей стоку і витоку.

В [3.20] приведено нанoeлектронний запам'ятовуючий пристрій на основі мемристорів з нижніми контактними електродами на підкладці. Запам'ятовуючий шар з оксиду металу має області оксиду, легованого магнітним матеріалом, з різними стехіометричними коефіцієнтами. Верхні контактні електроди знаходяться над запам'ятовуючим шаром. Принцип роботи пристрою заснований на перерозподілі кисневих вакансій в запам'ятовуючому шарі під дією зовнішнього електричного поля, що призводить до зміни провідності шару оксиду металу. Пристрій також дозволяє записувати, довгостроково зберігати і видаляти інформацію при прикладенні до електродів різниці потенціалів.

Виготовлення елементів пам'яті для розглянутого пристрою вимагає використання складних операцій оптичної літографії суцільної плівки запам'ятовуючого шару, в результаті чого формується матриця пам'яті з досить великими геометричними розмірами.

В [3.21] описана запам'ятовуюча матриця на основі мемристорних наноструктур, яка містить ізолювану підкладку, нижні контактні електроди, верхні контактні електроди. Запам'ятовуючий шар з суцільної плівки оксиду металу виконаний у вигляді ізолюваних нанорозмірних структур оксиду металу, кожна з яких відноситься до однієї комірки матриці пам'яті. Використання масиву ізолюваних нанорозмірних структур оксиду металу, кожна з яких відноситься до однієї комірки пам'яті, дозволяє зменшити геометричні розміри матриці пам'яті. Пропонований пристрій являє собою матрицю пам'яті на основі мемристорних нанорозмірних структур, виконану у вигляді масиву, що складається з необхідної кількості елементів пам'яті, що дозволяють записувати, зберігати і стирати інформацію.

Однак, в описаному пристрої не може бути реалізовано використання мемристорних наноструктур з властивостями нейрона, а саме коли передісторія функціонування мемристорної наноструктури визначає її відповідну реакцію.

В даній роботі автору вдалось створити запам'ятовуючу матрицю на основі мемристорних наноелектронних структур, в якій запам'ятовуючий шар, розташований між двома електродами, дозволяє змінювати опір при проведенні запису і стирання інформації, а також містить мемристорні наноструктури з властивостями нейрона, коли передісторія функціонування мемристорної наноструктури визначає її відповідну реакцію [3.22].

Вказані мемристорні наноструктури з властивостями нейрона дозволяють запам'ятовувати та обробляти інформацію, оскільки активність мемристорних наноструктур з властивостями нейрона визначається не тільки типом сигналу, а наявністю короткотривалої пам'яті. Останнє дозволяє конкретній мемристорній наноструктурі, що отримувала сигнали в недавньому минулому, значно легше активуватись, що дозволить суттєво розширити функціональні можливості пристрою.

На рис.3.12 представлена схема запам'ятовуючої матриці на основі мемристорних наноелектронних структур. Запам'ятовуюча матриця містить ізолюючу підкладку 1, нижні контактні електроди 2, запам'ятовуючі мемристорні наноелектронні структури 3 та верхні контактні електроди 4.

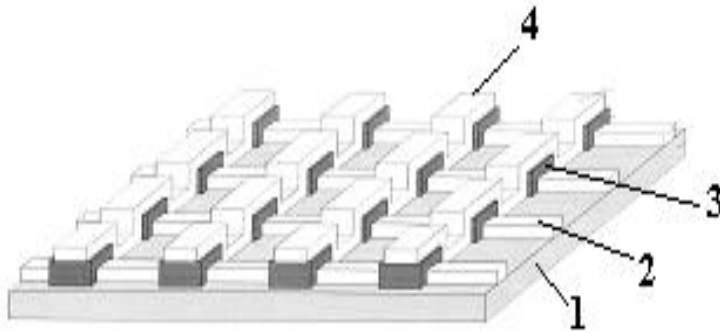


Рис.3.12. Схема запам'ятовуючої матриці на основі мемристорних нанoeлектронних структур.

При подачі на верхній контактний електрод 4 імпульсу порогової напруги, кисневі вакансії дрейфують в об'ємі запам'ятовуючого шару мемристорної нанoeлектронної структури 3 в зовнішньому електричному полі, що призводить до зниження контактної різниці потенціалів і ширини потенційного бар'єру на границі нижній контактний електрод - мемристорна нанoeлектронна структура, в результаті чого збільшується струм, що протікає через комірку пам'яті між нижнім контактним електродом 2 і верхнім контактним електродом 4. При подачі на нижній контактний електрод 2, розташований на ізолюючій підкладці 1, імпульсу порогової напруги кисневі вакансії дрейфують в обсязі запам'ятовуючого шару мемристорної нанoeлектронної структури 3 в зовнішньому електричному полі в зворотному напрямку, що призводить до збільшення контактної різниці потенціалів і ширини потенційного бар'єру на границі нижній контактний електрод - мемристорна нанoeлектронна структура, в результаті чого зменшується струм, що протікає через комірку пам'яті між нижнім контактним електродом 2 і верхнім контактним електродом 4.

Ізолююча підкладка 1 виготовлена з кремнію марки КНД товщиною 250 мкм. Нижні контактні електроди 2 виконані з палладію, верхні контактні електроди 4 виконані з титану. Нижні 2 та верхні електроди 4 нанесені на ізолюючу підкладку 1 методом хімічного осадження.

Мемристорна наноелектронна структура 3 товщиною 5 нм виготовлена на основі оксинітриду кремнію з використанням наночастинок сплаву Pd-Ag. Структура оксинітриду кремнію виготовляється за допомогою процесів реактивного магнетронного нанесення компонентів. При цьому застосовувалось розпилення магнетронних мішеней з додаванням газів кисню та азоту для отримання плівок оксинітриду кремнію [3.21]. Наночастинки сплаву Pd-Ag вибрані тому, оскільки мають високі параметри низького контактного опору в запам'ятовуючих комірках та забезпечують надійну передачу сигналів.

Сплав Pd-Ag виготовляється з використанням лігатури мідь-кремній, що містить 2 мас.% кремнію і решта мідь, і з подальшим введенням 10 мас.% даної лігатури в розплав основних компонентів паладію і срібла в індукційній печі в атмосфері інертного газу аргону. Температурний інтервал сплаву визначався методом диференційно-термічного аналізу. Склад сплаву контролювався за допомогою кількісного хімічного аналізу. Після одержання сплав піддавався гомогенізаційному відпалу в атмосфері інертного газу аргону.

Запропонований сплав Pd-Ag на основі паладію, що містить срібло, додатково містить кремній і мідь при наступному співвідношенні компонентів, мас. %: паладій - 50,0; срібло - 38; кремній - 0,1; мідь – 11,99 [3.22].

Мемристорна наноелектронна структура здатна змінювати свій опір в залежності від протікання через неї заряду у вигляді інтеграла струму за час роботи. Для того, щоб перемикає мемристор в активний стан, використовувались наночастинки сплаву Pd-Ag. Як тільки на мемристор подається струм, елемент нагрівається. Його нагрів призводить до розсіювання сплаву Pd-Ag в твердому середовищі мемристора. Виникають «дроти», які з'єднують два кінці мемристора. В результаті мемристор стає провідником електричного струму.

При відключенні електричного струму, структура не буде перебувати в стані з низьким опором внаслідок мемристорного ефекту. Останнє дозволяє конкретній мемристорній наноструктурі, що отримувала сигнали в недавньому минулому, значно легше активуватись, що дозволить суттєво розширити функціональні можливості пристрою, що пропонується. В цьому випадку виникає явище переконденсації.

Це процес конденсації пересиченої фази речовини на пізніх відрізках часу розвитку, коли закінчено етап нуклеації, а зростання великих зерен нової фази відбувається за рахунок більш дрібних без їх злипання.

У разі мемрістора це означає те, що сплав Pd-Ag не знаходиться довгий час у вигляді нанодроти. Частинки такої структури збираються разом, поступово укрупнюючись. Менші частки одного і того ж елемента збираються разом. Мемристор поводить себе подібно нейрону. Якщо повторний сигнал був поданий на мемристор майже відразу після отримання першого сигналу, то його провідність з наявністю сплаву Pd-Ag залишається колишньою, тобто - високою. Але якщо на мемристор довгий час не подавати струм, нанодріт розділяється на менші частинки, які розходяться по об'єму мемрістора, і провідність його падає до початкових значень.

Таким чином, пропонований пристрій являє собою матрицю пам'яті на основі мемристорних наноелектронних структур, виконану у вигляді масиву, що складається з необхідної кількості елементів пам'яті, що дозволяють записувати, зберігати і стирати інформацію.

3.10. Висновки.

1. Розроблено запам'ятовуючу матрицю на основі мемристорних наноелектронних структур, в якій запам'ятовуючий шар, розташований між двома електродами, дозволяє змінювати опір при проведенні запису і стирання інформації, а також дозволяє вказаним наноструктурам проявляти властивості нейрона, коли передісторія функціонування мемристорної структури визначає її відповідну реакцію.

2. Досліджено мемристорні наноструктури з властивостями нейрона, який здатний запам'ятовувати та обробляти інформацію, оскільки активність мемристорних наноструктур визначається не тільки типом сигналу, а наявністю короткострокової пам'яті. Останнє дозволяє конкретній мемристорній наноструктурі, що отримувала сигнали в недавньому минулому, значно легше активуватись, що дає можливість суттєво розширити функціональні можливості запам'ятовуючого пристрою.

3. Досліджено, що мемристивний ефект проявляється не тільки в суцільних оксидних шарах, але і в упорядкованих масивах нанотрубок діоксиду титану, які одержують шляхом електрохімічного окислення титану при різних умовах. Показа-

но, що товщина і дефектність оксидного шару визначається відношенням між електричним опором структури в низько - і високоомному станах.

4. Розглянуто процеси формування та самовпорядкування нанотубулярних оксидних шарів на основі діоксиду титану, як функціонального середовища елементів мемристивної пам'яті.

5. Досліджено мемристивні елементи в повних циклах резистивного перемикання і в процесах, що дозволяють багаторазове зчитування інформації. Показано, що високе співвідношення електричного опору структури в низько - і високоомному станах може підвищити стійкість до електромагнітних завад при функціонуванні перспективних мемристорних запам'ятовуючих пристроїв.

6. Розроблена мемристорна наноелектронна структура товщиною 5 нм, яка виготовлена на основі оксинітриду кремнію з використанням наночастинок сплаву Pd-Ag. Структура оксинітриду кремнію виготовляється за допомогою процесів реактивного магнетронного нанесення компонентів. При цьому застосовують розпилення магнетронних мішеней з додаванням газів кисню та азоту для отримання плівок оксинітриду кремнію. Наночастинки сплаву Pd-Ag мають високі параметри низького контактного опору в запам'ятовуючих комірках та забезпечують надійну передачу сигналів.

Розділ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА СТВОРЕННЯ ЗРАЗКІВ МОЛЕКУЛЯРНОЇ ПАМ'ЯТІ НА ОСНОВІ БАКТЕРІОРОДОПСИНУ ТА ФАРБНИКІВ.

4.1. Дослідження інформаційних моделей молекулярної пам'яті на основі молекулярного зберігання даних.

Архітектура паралельних обчислювальних систем, що традиційно використовувалась в обчислювальній техніці, реалізується на основі твердотільної мікроелектронної елементної бази, але досить очевидно, що така архітектура цілком підходить для молекулярних систем. Ідея паралельних обчислень відкриває шлях до вирішення двох принципових проблем створення молекулярних обчислювальних пристроїв. З одного боку враховується проблема адресації, тому що відпадає необхідність контакту до кожного логічного молекулярного елемента. З іншого боку, багато типів паралельних обчислювальних систем стійкі до виходу з ладу визначеного числа логічних елементів. Це відбувається в результаті технологічних дефектів молекулярних шарів, що не приводять до виходу з ладу всієї обчислювальної системи, а лише послабляють інтенсивність вихідного сигналу.

Запам'ятовуючими структурами в обчислювальних системах паралельної дії можливе використання зі значною ефективністю молекулярних структур, таких природних об'єктів, як пептиди, зокрема бактеріородопсин, родопсин, фітохром, ряд ферментів. При використанні молекулярних структур необхідно вирішити таку дуже важливу проблему, як стикування біомолекулярних об'єктів з макроскопічними опто- і мікроелектронними пристроями введення-виведення інформації [B.11, 4.1,4.2]. Основним мікроелектронним об'єктом стикування елементів пам'яті з пристроями керування можна розглядати польовий МДН-транзистор, затвор якого зв'язаний з молекулярним фрагментом пам'яті. Очевидно, що при площі затвора транзистора 1 мкм^2 буде сприйматися сумарний відгук від великого числа молекул (10^3 - 10^4). Проблему по зняттю сигналу з такої кількості молекул можна вирішувати різними методами [B.12]. Одним з таких методів є стикування звичайних МДН польових транзисторів із фрагментами пурпурних мембран, що являють собою білкові молекули бактеріородопсину (БР) , упаковані в двошарову ліпідну мембрану.

Основною властивістю молекули БР є перенесення протона з однієї сторони мембрани на іншу при поглинанні кванта світла з довжиною хвилі 570 нм. Акт переносу протона може бути зареєстрований за допомогою польового транзистора, у якому на місці затвора розташована пурпурна мембрана. Оскільки лінійні розміри пурпурних мембран співпадають з розмірами транзисторів (до 1,0 мкм), то таке стикування виявляється цілком реальним. Шари БР, що складаються з пурпурних мембран можуть бути нанесені на підкладку методом Ленгмюра-Блоджетт. Таким чином, можна виконувати стикування мікроелектронних систем з молекулярними, а також робити перетворення оптичних сигналів в електричні.

Основною особливістю перерахованих вище молекулярних носіїв, використовуваних розроблювачами запам'ятовуючих структур, є наявність двох станів молекулярної структури. Зазначена здатність дозволяє визначати поточний стан молекули за допомогою лазера, налаштованого на відповідну частоту. У даній роботі розглядається система пам'яті, у якій молекулярний носій запам'ятовує дані в тривимірній матриці у виді прозорої капсули, заповненої поліакридним гелем.

Розглянемо особливості формування зображень з застосуванням молекулярних носіїв при реєстрації останніх, як вказувалось вище, в ІК-діапазоні. Один з варіантів капсули для вказаного середовища може мати розміри 20 x 20 x 40 мм. Для функціонування пам'яті капсулу поміщають у запам'ятовуючий пристрій, в якому крім капсули є ще кілька лазерів і детекторна матриця, реалізована на базі приладу, що використовує принцип зарядової інжекції, що, в свою чергу, дозволяє робити запис і читання даних в процесі формування зображень [4.3, 4.4].

Перед записом даних за допомогою жовтого сторінкового лазера на 590 нм виконується активізація збудженої площини в матеріалі всередині капсули. Одержання енергетично активної площини у вигляді сторінки даних, вимагає наявності просторового світлового модулятора. Таким модулятором може бути рідиннокристалічна матриця, що створює маску на шляху лазерного променя. Таким чином, при активізації записуючої площини відбувається перехід молекул в О-стан, що відповідає значенню біта "0".

Для запису інформації включається червоний лазер, перед яким також встановлюється просторовий світловий модулятор, що відображає двійкові дані. При цьому останній створює на шляху променя необхідну маску, що сприяє опроміненню тільки визначених ділянок сторінки згідно заданого зображення. Молекули в таких місцях будуть відповідати двійковій одиниці на відміну від частини сторінки, що залишилася, що представляє двійкові нулі.

Для читання інформації необхідно включити зчитуючий лазер, при цьому, через розходження в спектрах поглинання, необхідно ідентифікувати двійкові нулі й одиниці. Молекули, що представляють двійковий нуль, поглинають червоне світло, а відповідаючи за двійкову одиницю пропускають промінь повз себе. У результаті виходить малюнок із світлих і темних ділянок на фотореєструючій матриці. Остання дозволяє зберігати сторінку цифрової інформації.

Для стирання даних досить короткого імпульсу синього лазера, щоб повернути молекули зі стану двійкової одиниці в двійковий нуль. Сторінка даних може бути прочитана без руйнування до 5000 разів, після чого оновлюється за допомогою нового запису.

За допомогою запропонованої запам'ятовуючої структури можна одержати доступ до даних зі швидкістю до 90 МВ/с за умови об'єднання по восьми запам'ятовуючих бітових осередків у байт із паралельним доступом і відповідної схемотехнічної реалізації системи пам'яті. Ємність даних у розглянутої кювети може досягати до 1,4 GB, оскільки подальше збільшення ємності даних зв'язано з конструктивними особливостями лінзової системи, а також з якістю безпосередньо самого молекулярного носія [4.5].

При обробці молекулярного носія лазерним променем під час запису-стирання з енергією вище 8- 10 мдж/см² не досягається істотного збільшення рівня сигналу зчитування інформації. Сигнал з матриці, де відбувається процес фотореєстрації, поступає у відповідні блоки обробки з подальшою реєстрацією на моніторі ЕОМ.

Проведені дослідження дозволяють говорити про збереження й обробку інформації на молекулярному рівні. Ідентифікація двійкових нулів і одиниць дося-

гається за рахунок різниці спектрів поглинань лазерного випромінювання різними станами досліджуваної молекулярної структури. При цьому молекули, що поглинають світло, відповідають двійковому нулю, а молекули, що пропускають лазерний промінь повз себе, відповідають двійковій одиниці.

Досліджувані молекулярні запам'ятовуючі структури, крім надвисокої щільності запису інформації, майже не мають втрат енергії на виконання однієї логічної операції, а також дозволяють досягати масового паралелізму. Гібридні системи збереження й обробки інформації, що об'єднують властивості твердотільних ЕОМ і молекулярних обчислювальних систем, можуть бути ефективно використані в різних галузях науки і техніки, насамперед, в процесах обробки зображень.

Значні перспективи, що відкриває технологія запису і зчитування інформації на світлочутливому матеріалі, дозволяють забезпечити максимальну швидкість доступу до даних. Це досягається за рахунок того, що оброблюваний масив даних кодується в один великий блок даних, що, у свою чергу, записується усього за одне звертання. Якщо врахувати, що така запам'ятовуюча система для обробки інформації не містить частин, що рухаються, і доступ до сторінок виконується паралельно, то запам'ятовуючий пристрій у цілому може дозволити зберігати інформацію об'ємом у десятки гігабайт.

Розглянемо можливості побудови моделі молекулярної пам'яті на основі функціонування пептиду БР. Вихідною концепцією при цьому є молекулярне зберігання даних. В [В.8] наведені результати з побудови молекулярної пам'яті з використанням властивостей БР, а в окремих експериментах пептиду фітохром. За основу забезпечення працездатності зазначеної моделі були використані підходи, наведені в [В.12]. При цьому використовувалася можливість функціонування підсистеми пам'яті, що використовує для запам'ятовування цифрові біти - молекули. Молекули пептиду БР при дуже низькому рівні вмісту кисню в навколишньому середовищі, коли для отримання енергії неможливо використовувати процес окислювання, здатні виробляти енергію шляхом фотосинтезу.

4.2. Розробка елементів молекулярної пам'яті на основі пептиду БР.

Розробка і дослідження елементів молекулярної пам'яті на основі пептиду БР

має важливе значення, оскільки останній є прототипом пептиду ока людини - родопсину, який відповідає за обробку зорової інформації.

Важливим підходом для розробки елементів молекулярної пам'яті є використання розгалуженого фотоциклу пептиду БР. Оскільки здатність поглинання стану О всередині активованого обсягу БР більше ніж в 1000 разів від інших елементів об'єму, то для створення великого диференціального сигналу можна використовувати навіть слабе джерело випромінювання (рис.4.1).

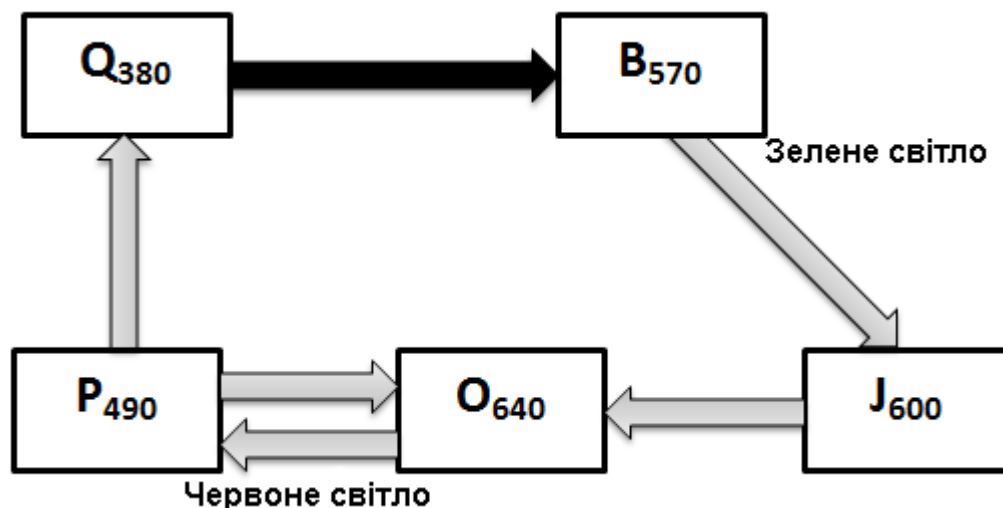


Рис.4.1. Схема розгалуженого циклу функціонування пептиду БР.

Перший лазерний імпульс ініціює перехід з основного стану В в стан J, з якого відбувається теплова релаксація в стан О. Далі можливі два варіанти: або система повертається в початковий стан В, або під дією другого лазерного імпульсу переходить в стан Р, який повільно релаксує в стан Q, з якого, в свою чергу, можливий перехід в основний стан В.

Як видно з рис.4.1, при певних рН або при дейонізації БР можливий перехід до проміжних станів Р і Q.

БР був обраний тому, що фотоцикл (послідовність структурних змін, які молекула зазнає при реакції зі світлом) робить цю молекулу ідеальним логічним запам'ятовуючим елементом або перемикачем з одного стану в інший (тригер). Як показали дослідження, В-стан (логічне значення «0») і Q-стан (логічне значення «1») є про-

міжними станами молекули і можуть залишатися стабільними протягом багатьох років.

Іншою важливою особливістю БР є те, що вказані два стани мають спектри поглинання, які помітно відрізняються. Це дозволяє легко визначити поточний стан молекули за допомогою лазера, налаштованого на відповідну частоту. Дані, записані в такому пристрої, можуть зберігатися близько п'яти років.

В даній роботі був побудований прототип системи пам'яті, в якому БР запам'ятовує дані в тривимірній матриці. Така матриця являє собою кювету (прозора посуда), заповнену поліакридним гелем, в який поміщений пептид. Кювета має довгасту форму розміром 25х25х50 мм. Пептид, який знаходиться в В-стані, фіксується в просторі при полімеризації гелю. Кювета, група лазерів і детекторна матриця входять до складу приладу, який використовує принцип зарядової інжекції (CID - Charge Injection Device) та дозволяє здійснювати процеси запису і читання даних.

При запису даних необхідний перехід молекул у Q-стан, для чого треба використати жовтий «сторінковий» лазер. Просторовий світловий модулятор (SLM), який являє собою LCD-матрицю, створює маску на шляху променя і викликає активацію збудженої площини в матеріалі усередині кювети (рис.4.2).

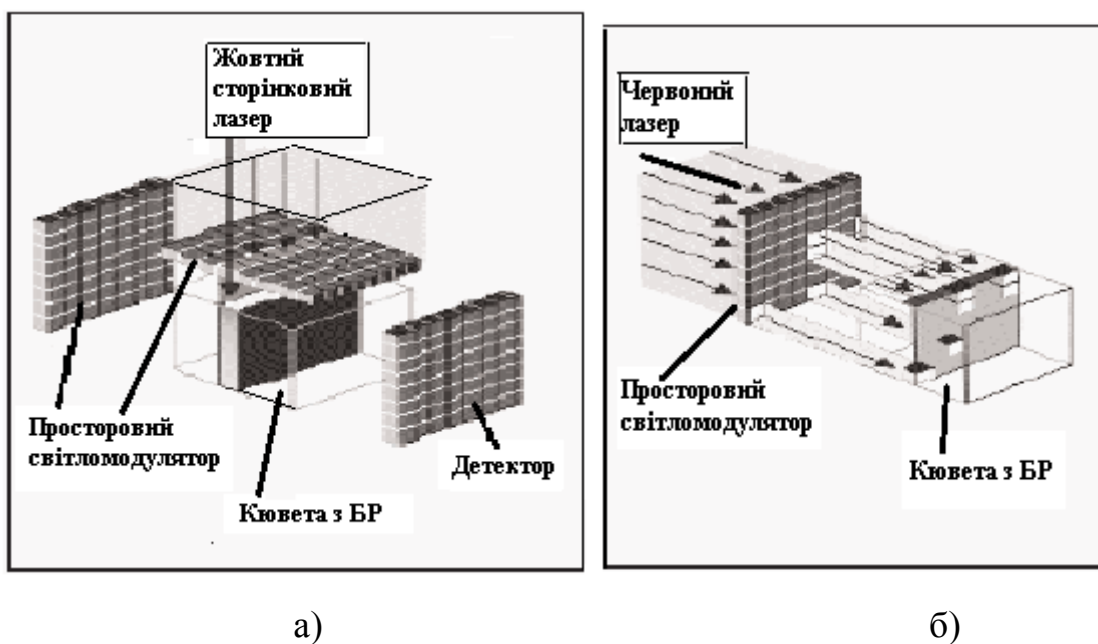


Рис.4.2. Схема запису на сторінці на основі БР: а – активація сторінки в основному стані В; б- запис на сторінці з БР за допомогою просторового світломодулятора.

Ця енергоактивна площа є сторінкою даних, яка може вмістити масив розміром 4096x4096 комірок. Для повернення БР в стан спокою використовується червоний записуючий лазер, що розташовується під прямим кутом по відношенню до жовтого. Другий SLM також керується матрицею двійкових даних і, таким чином, створює на шляху променя від-повідну маску, тому опроміненню піддаються тільки певні точки сторінки. Молекули в цих місцях перейдуть у Q-стан і будуть представляти двійкову одиницю. Частина сторінки повернеться в початковий В-стан і буде представляти нулі. Для того щоб прочитати дані, треба знову використовувати сторінковий лазер, який переводить читану сторінку в Q-стан. Це робиться для того, щоб в подальшому за допомогою відмінності в спектрах поглинання ідентифікувати двійкові нулі і одиниці. Через дві мілісекунди після цього сторінка опромінюється червоним лазером низької інтенсивності випромінювання. Низька інтенсивність потрібна для того, щоб попередити перехід молекул у Q-стан.

Молекули, що представляють двійковий нуль, поглинають червоне світло, а молекули, які представляють двійкову одиницю - не реагують на нього. Це створює «шаховий» малюнок зі світлих і темних плям на LCD-матриці, яка зчитує сторінку цифрової інформації.

Основний стан В може відповідати логічному значенню біта "0", Q- та Р-інтермедіати - логічному значенню біта "1". Дані, записані на пристрої пам'яті на основі БР, можуть зберігатися до п'яти років. Оскільки інтермедіати БР мають помітно відрізняючі спектри поглинання, легко визначити поточний стан молекули за допомогою лазера, налаштованого на відповідну частоту.

Первинним процесом в операціях, як читання, так і запису є вибір тонкого пептидного сегмента в обсязі носія і його активація (ініціалізація) лазерним імпульсом. Ця тонка активована область називається сторінкою (page), а процес активації - пейджинг. Товщина сторінки залежить від оптичного пристрою і варіюється від 15 мкм в разі системи призм до 100 мкм в разі простих циліндричних лінз. Через 10 мсек після пейджінга активується лазер даних і просторовий світломодулятор (SLM) для опромінення тих елементів обсягу, в які буде записана логічна "1". Цей процес перетворює стан О в стан Р в даних сегментах простору, і тільки в них. Через деякий

час стан Р термічно релаксує в стан Q. Процес запису завершується через ~ 10 мс, необхідних для завершення фотоциклу. Частина сторінки повернеться в первинний стан В і буде являти собою двійкові "0".

Читання даних відбувається з використанням диференціального поглинання: світло з довжиною хвилі 600-640 нм ефективно поглинається тільки двома інтермедіатами фотоциклу світлоадаптованого БР - J і O (рис. 4.3).

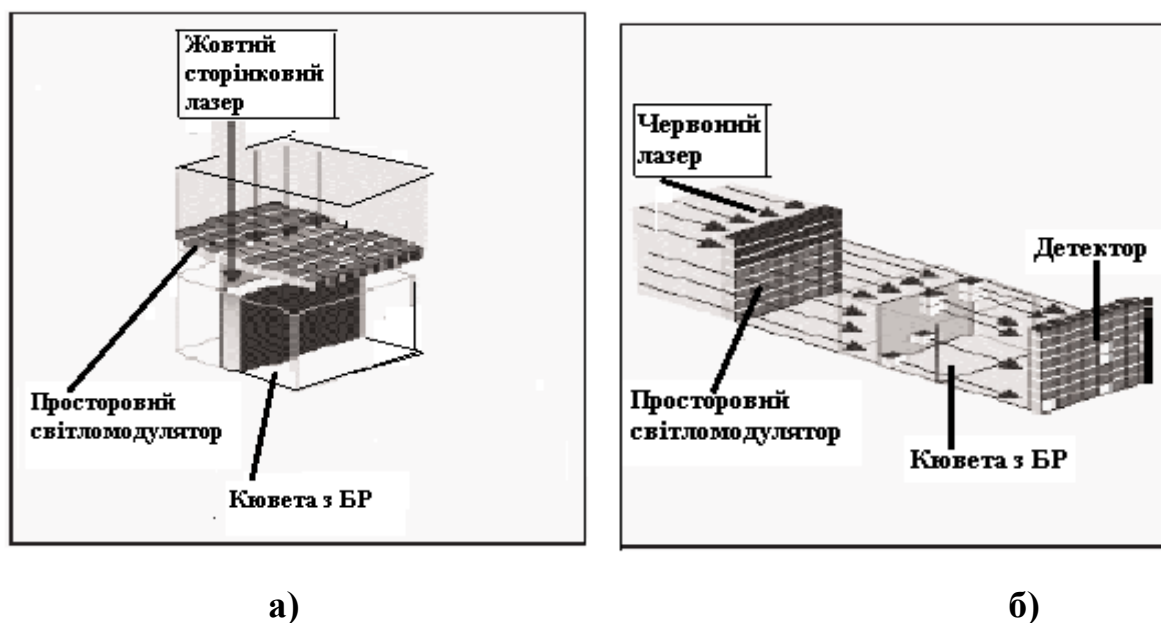


Рис.4.3. Схема читання із сторінок на основі БР: а – активація сторінки в основному стані В; б- читання сторінки на ПЗЗ-детекторі.

Через 2 мс сторінка через SLM висвітлюється низькоінтенсивним світловим потоком червоного лазера. Низька інтенсивність потрібна для того, щоб попередити "перестрибування" молекул БР в стан Q. Молекули, що представляють собою двійковий "0", поглинають червоне світло, а представляючи двійкову "1" пропускають промінь через себе. Це створює малюнок зі світлих і темних плям на матриці детектора, який зчитує сторінку цифрової інформації.

Для забезпечення цілісності даних при вибіркового стиранні сторінок застосовується кешування декількох суміжних сторінок. При операціях читання -запису також використовуються два додаткових біти парності, щоб захиститися від помилок. Сторінка даних може бути прочитана без руйнування до 4500-5000 разів. Кожна

сторінка відслідковується лічильником, і якщо відбувається 1024 читання, то сторінка відновлюється за допомогою нової операції запису.

З огляду на те, що молекула БР змінює свої стани в межах 2-3 мс, сумарний час для виконання операції читання або запису становить близько 10-15 мс. Однак, оскільки цей пристрій здійснює паралельний доступ в циклі читання-запису, можна розраховувати на швидкість до 8-10 Мб / нс. Якщо об'єднати по восьми запам'ятовуючих бітових комірок у байт з паралельним доступом, можна досягти швидкості 70-80 Мб / нс, але необхідна відповідна схмотехнічна реалізація підсистеми пам'яті.

Дані можуть стиратися посторінково або повністю. Для повного стирання даних досить короткого імпульсу синього лазера, щоб повернути молекули БР зі стану Q в початковий стан В. Синє світло не обов'язково повинне йти від лазера: можна стерти всю інформацію кювети за допомогою звичайної ультрафіолетової лампи. При використанні джерела когерентного світла з довжиною хвилі близько 410 нм, яке поглинається як станом Р, так і станом Q, можна вибірково стирати сторінки.

Запропонована молекулярна пам'ять має певні переваги в порівнянні з традиційною напівпровідниковою пам'яттю. По-перше, вона заснована на пептиді, що виробляється у великій кількості і за невисокою ціною, чому сприяють досягнення генної інженерії. По-друге, система може функціонувати в більш широкому діапазоні температур, ніж існуюча напівпровідникова пам'ять. По-третє, така пам'ять енергонезалежна. По-четверте, збудження розділені в часі, що дозволяє повністю виключити фотохімічні процеси поза опроміненого обсягу, що спрощує оптичну систему і збільшує надійність. Нарешті, кювети з даними можна довго і безпечно зберігати.

Хороша селективність операції читання забезпечує прийнятне співвідношення сигнал / шум навіть при товстих (1-1,6 см) носіях пам'яті, що містять більше 1000 сторінок. Оскільки поглиняюча здатність стану О всередині активованого обсягу більш ніж в 1000 разів вище, ніж у інших елементів обсягу, для створення великого диференціального сигналу можна використовувати навіть слабке джерело випромінювання. Процес читання може бути завершений протягом приблизно 6 мс, однак

наступне читання не може бути виконане до повного завершення фотоциклу. Це збільшує повний час циклу читання при послідовному читанні до 10 мс.

Запропонована система по швидкодії близька до напівпровідникової пам'яті, поки не зустрінеться сторінковий дефект. При виявленні такого дефекту необхідно перенаправляти промінь для доступу до таких сторінок з іншого боку. Теоретично кювета може вмістити 1 Тб даних, а обмеження на ємність пов'язані, в основному, з дефектами лінзової системи і чистотою БР.

Використання методів диференціального поглинання, описаного вище, дозволяє записати фоновий рівень станів Р і Q і використовувати його згодом для корекції зчитувальних даних. Конструкція підсистеми пам'яті, заснованої на БР, дозволяє вдосконалювати оптичну систему при роботі із іншими зразками пептидів.

Досягнення в технологіях побудови центральних процесорів привели до того, що лімітуючим швидкість компонентом тепер є не центральний процесор, а пам'ять. Як наслідок, виникла необхідність в пошуку нових архітектур пам'яті, що забезпечують меншу вартість, можливості місцевої обробки і збільшення пропускної здатності. БР унікальний щодо термічної і фотохімічної стабільності, легкої модифікованості, що дозволяє застосовувати його в різних пристроях із обробки інформації зображень.

4.3. Створення запам'ятовуючого пристрою на основі оптичної нано-пам'яті з використанням молекулярних структур фарбників.

Для створення запам'ятовуючих пристроїв з використанням молекулярної електроніки необхідно налагоджувати виробництво надійних компонентів молекулярних масштабів, здатних запам'ятовувати, відтворювати і обробляти інформацію за допомогою світла певної довжини хвилі.

Однією з фундаментальних властивостей цих молекул повинна бути здатність разом з іншими молекулами або іонами до самозбирання в системи більш високого ступеню складності, в мультикомпонентні молекули, або супрамолекули. Детальна розробка загального підходу до створення і вивчення об'єктів, заснованих на використанні fotocутливих молекул, дозволить вирішити завдання молекулярної інженерії фотоперемикаючих молекулярних пристроїв.

Найбільш підходящим типом реакції, який може забезпечити процес ефективного самозбирання в супрамолекули, представляється комплексоутворення, причому для створення різноманітних і складних супрамолекул вихідні з'єднання повинні бути селективними комплексонами. Перспективними в цьому відношенні серед фоточутливих з'єднань є фотохромні і люмінесцентні сполуки, здатні до зворотних, індукованих світлом, структурних перетворень на основі молекулярного фотоперемикання.

В даній роботі був запропонований запам'ятовуючий пристрій на основі оптичної нанопам'яті з використанням молекулярних структур фарбників. Для цього було виконано дослідження відомих пристроїв, які здатні вирішувати подібні задачі. Було проаналізовано роботу запам'ятовуючого середовища з використанням надшвидкого фотоперемикання молекул ретинальвмісних білків [4.6], яке містить ретинальвмісний білок, що забезпечує швидке фотоперемикання шляхом переведення зазначеного білку при кімнатній температурі з вихідного стану в проміжний стан. У вказаному запам'ятовуючому середовищі органічні молекулярні структури та набір оптичних засобів дозволяють переводити вказані структури з одного стану в інший.

Переведення запропонованого білка проводиться шляхом впливу на нього першим світловим імпульсом з довжиною хвилі, яка знаходиться в діапазоні, відповідному області поглинання вихідного стану, і подальше його повернення в початковий стан шляхом впливу другим світловим імпульсом з довжиною хвилі, яка знаходиться в діапазоні, відповідному області, в якій відбувається поглинання проміжного стану.

В запропонованому пристрої не забезпечується висока стійкість носія інформації, що справедливо як для записуючого шару, так і для розчину, використаного при виготовленні записуючого шару, а також величина фотоіндукованої зміни показника заломлення фотохромних сполук недостатня для надійного неструктурного зчитування оптичної інформації, зареєстрованої в фотохромних матеріалах.

Вивчалось фотохромне реєструюче середовище для трьохмірної оптичної пам'яті [4.7], яке містить реєструюче середовище з неструктурним фоторефрак-

тивним зчитуванням оптичної інформації на довжині хвилі гелій-неонового лазера (632,8 нм) у вигляді шару, який містить термічно необоротну фотохромну сполуку із групи диарилетенів. В такому середовищі зчитування оптичної інформації для використання в багатошарових оптичних дисках нового покоління з інформаційною ємністю понад 1 Тбайт забезпечує роботу тривимірної (3D) оперативної оптичної пам'яті. В даному реєструючому середовищі використовується оптично прозора полімерно сполука.

В досліджуваному пристрої не забезпечується необхідна стійкість носія інформації. Величина фотоіндукованої зміни показника заломлення фотохромних сполук недостатня для надійного недеструктивного зчитування оптичної інформації у вказаних фотохромних матеріалах.

В запам'ятовуючому середовищі на основі БР для оптичної пам'яті з фотохромною реєстрацією стану молекулярної структури тривимірної оптичної пам'яті [4.5] використовується пептид БР у вигляді мембрани з семи альфа-спіральних сегментів. Коли мембрана поглинає світло, структура пептиду нагнітає протон, який використовується як джерело енергії. При цьому пептид використовується для зберігання інформації, використовуючи світло, щоб викликати зміни геометрії хромофору.

Різні стани молекули БР: bR, M, O, P та Q у фотоциклі молекули мають зовсім різні спектри поглинання і можуть бути оптично розпізнані. Дані записуються паралельно за допомогою реакції розгалуження. Початковим процесом як при написанні, так і при читанні є вибір і активація тонкого сегменту пептиду в середовищі об'ємної пам'яті. Це тонке активоване середовище називається сторінкою, і процес активації називається пейджинговим. Товщина сторінки залежить від оптичного розташування і коливається від середньоквадратичного значення 15 мкм (система декількох призм) до 100 мкм (проста циліндрична лінза). Дані потім записуються за допомогою ортогонального пучка світла, який зміщується в часі та фотоактивує стан O. В розглянутому пристрої не забезпечується висока стійкість носія інформації, а також величина фотоіндукованої зміни показника заломлення фотохромних сполук недостатня для надійного недеструктивного зчитування оптичної інформації.

В оптичному запам'ятовуючому пристрої на основі флуоресцентних пептидів [4.8] використано фотохромний флуоресцентний пептидний фрагмент, що має два або більше стабільних станів із спектрами збудження або випромінювання, які зміщені з однієї області хвилі в іншу область хвиль в обох станах. Фотохромний матеріал перемикається між станами опроміненням з урахуванням відповідних довжин хвиль. Два стани, як правило, стабільні при кімнатній температурі.

Пристрій може виконувати зберігання та відновлення інформації за допомогою ряду етапів: адресації фотохромного флуоресцентного пептидного фрагменту; включення фотохромного флуоресцентного пептидного фрагменту на довжині хвилі запису; опромінення фотохромного флуоресцентного білкового фрагмента з довжиною хвилі читання; виявлення вихідного сигналу для визначення стану фотохромної флуоресцентної частини пептиду. Пристрій може додатково включати етап виявлення фотохромного флуоресцентного пептидного фрагмента на довжині хвилі стирання інформації. При закінченні роботи пристрою можна включити вимірювання довжини хвилі випромінювання. Як запам'ятовуюче середовище можуть бути використані амінокислоти бета-аланін, фенілгліцин або гомоаргінін.

В такому пристрої не забезпечується висока стійкість носія інформації, що справедливо як для записуючого шару, так і для розчину, використовуваного при виготовленні записуючого шару, а величина фотоіндукованої зміни показника заломлення фотохромних сполук недостатня для надійного зчитування оптичної інформації за допомогою фотохромних матеріалів.

В запам'ятовуючому оптичному пристрої [4.9] використано підкладку із записуючим шаром, розташованим поверх підкладки. Такий шар складається з носія інформації та відображаючого шару, розташованого поверх записуючого шару і захисного лакового шару, розташованого поверх відображаючого шару.

Носій інформації в такому пристрої стабілізується шляхом заміщення частини іонів протилежного заряду катіонного барвника за допомогою аніонів металоорганічного тіолонового комплексу, який бере на себе функції гасителя, і при цьому не вимагає введення в носій інформації ніякого традиційного гасителя. Для цього випадку підходять, зокрема, аніонні тіолонові комплекси з центральним атомом мета-

лу, принаймні, з двома валентностями. Підкладку виготовляють за допомогою лиття під тиском, носій інформації наносять на підкладку за допомогою центрифугування, потім розчинник видаляють з носія інформації, нанесеної центрифугуванням, металевий шар наносять на записуючий шар як відбиваючий шар шляхом напилення і покривають захисним лаком.

В такому пристрої не забезпечується висока стійкість носія інформації записуючого шару, а величина фотоіндукованої зміни показника заломлення фотохромних сполук недостатня для надійного зчитування оптичної інформації з фотохромних матеріалів.

В даній роботі була поставлена задача створити такий пристрій, в якому, через введення нових елементів було б можливо реалізувати високу стійкість носія інформації для записуючого шару і для розчину, використаного при виготовленні записуючого шару, а також забезпечити величину фотоіндукованої зміни показника заломлення фотохромних сполук достатньою для надійного неdestructивного зчитування оптичної інформації, зареєстрованої в фотохромних матеріалах, що дозволить суттєво розширити функціональні можливості пристрою, що пропонується [4.10].

Вказаний запам'ятовуючий пристрій на основі оптичної нанопам'яті, який пропонується, включає в себе органічне молекулярне запам'ятовуюче середовище і набір оптичних засобів для переведення вказаного середовища з одного стану в інше, а також містить молекулярне запам'ятовуюче середовище на основі краунмісного стирилового барвника.

В даному приладі є можливість реалізувати високу стійкість носія інформації для записуючого шару і для розчину, який використовується при виготовленні записуючого шару, а також забезпечити величину фотоіндукованої зміни показника заломлення фотохромних сполук достатньою для надійного зчитування оптичної інформації (рис.4.4). На рис.4.4 представлено принцип побудови запам'ятовуючої структури, яка містить підкладку 1 із запам'ятовуючою структурою 2, розташованою поверх підкладки, та відображаючого шару 3, розташованого поверх за-

пам'ятовуючої структури 2 і захисного лакового шару 4, розташованого поверх відображаючого шару 3.

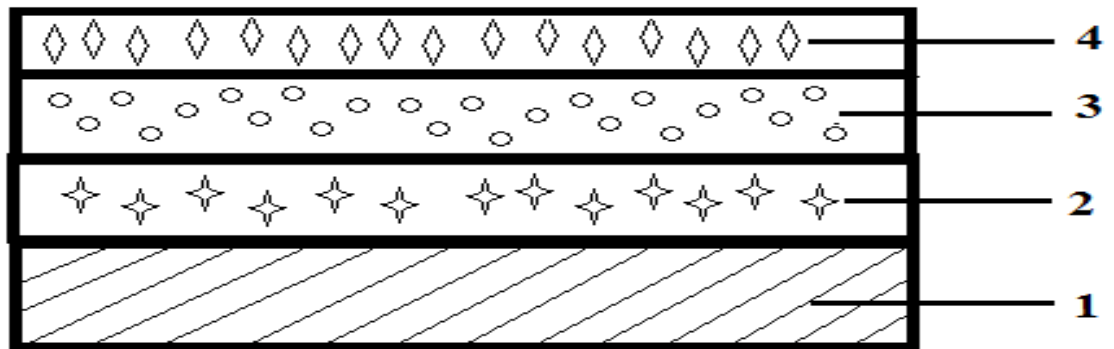


Рис.4.4. Принцип побудови запам'ятовуючої структури.

На фіг.4.5 представлена схема формування запам'ятовуючої структури 2 на основі краунвмісного стирилового барвника.

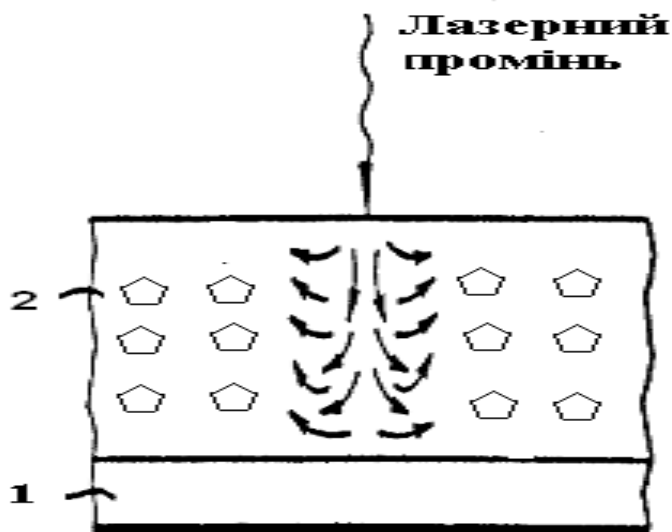


Рис.4.5. Схема формування запам'ятовуючої структури на основі краунвмісного стирилового барвника.

Елементи запам'ятовуючої структури 2, розташовані на підкладці 1, здатні функціонувати в рядках та стовпцях, що становлять матрицю. Для формування запам'ятовуючої структури 2 промінь лазера взаємодіє з елементами запам'ятовуючої структури на основі краунвмісного стирилового барвника.

Підкладка 1 виготовлена з прозорого полімерного матеріалу -полікарбонату.

Дана запам'ятовуюча структура 2 відноситься до типу структур для цифрового оптичного запам'ятовуючого пристрою, де інформація записується на тонкому шарі за допомогою світлового імпульсу високої інтенсивності, зазвичай сильно сфокусованого лазерного променя на довжині хвилі 570 нм. Після того, як інформація записана на шарі запам'ятовуючої структури 2, він не може бути повернутий в свій початковий стан, але інформація може бути зчитана багато разів за допомогою слабкого світлового променя, який не робить додаткового впливу на фізичний стан шару. Шар записує інформацію в результаті змін під впливом потужного записуючого світлового імпульсу і є фактично шаром, який запам'ятовує інформацію.

Технологія оптичного пристрою, що запам'ятовує майже виключно заснована на відбивальному контрасті між записаними знаками в запам'ятовуючому шарі або його безпосередньому оточенні. Сфокусований лазерний промінь пропускається уздовж запам'ятовуючого шару, і записуються зміни сили відбитого лазерного світла, коли промінь проходить записаний текст. Типовий текст може бути у вигляді невеликих круглих або подовжених заглиблень розміром між 0,5 і 7 мкм.

На рис. 4.5 елементи запам'ятовуючої структури 2 можуть представляти двійковий "0" або двійкову "1", і проміжок між суміжними елементами запам'ятовуючої структури 2 може представляти двійкову 1 або двійковий 0, причому флуоресценція в цьому проміжку випускається самою запам'ятовуючою структурою 2.

Ступінь гасіння флуоресценції може бути встановлено для запам'ятовуючої структури 2 наступним чином. Це може бути зроблено, як показано на фіг. 4.5 і фіг.4.6, на яких записуючий імпульс, тобто промінь лазерного світла падає на запам'ятовуючу структуру 2 (фіг.4.5), розм'якшуючи і розплавляючи матеріал в флуоресцентному шарі запам'ятовуючої структури 2(фіг. 4.6), утворюючи елементи запам'ятовуючої структури 2 в вигляді поглиблення в цій структурі.

Процес виготовлення такого запам'ятовуючого пристрою складається з наступних етапів:

- виготовлення полікарбонатної підкладки шляхом лиття під тиском;

- нанесення розчину на обертову підкладку, в якому розчинені компоненти носія інформації; це може бути, наприклад, колоїдний розчин в органічному розчиннику або суміші розчинників, при цьому даний розчин розподіляється по підкладці за допомогою відцентрової сили, а зайвий розчин видаляється центрифугуванням;

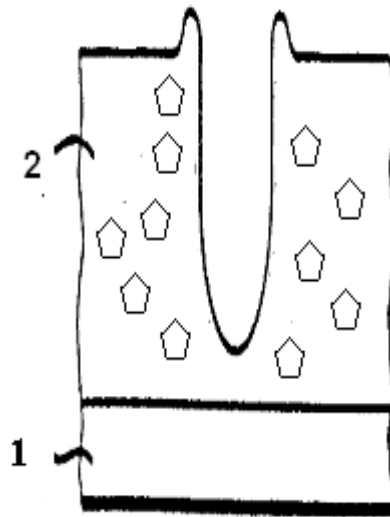


Рис.4.6. Схема утворення запам'ятовуючого елемента.

- видалення розчинника або суміші розчинників шляхом випаровування;
- нанесення відбиваючого шару напиленням;
- нанесення і затвердіння захисного лаку.

Для отримання записуючих шарів розчин носія інформації товщиною від 170 до 200 нм наноситься шляхом центрифугування на сторону полікарбонатної підкладки, що має канавки. Потім підкладки з покриттями сушаться при 80°C. Після цього за допомогою напилення на висушений записуючий шар наноситься шар алюмінію завтовшки від 60 до 90 нм. Потім на ньому шляхом центрифугування наноситься захисний лак, який твердіє під дією ультрафіолетового світла.

Для забезпечення запису пристрій переміщається щодо лазерного променя (записуючого променя) уздовж канавки, що повертається. Інформація на нього записується за допомогою лазера, при цьому лазер направляється на відображаючий шар через підкладку і записуючий шар. При цьому діапазон довжин хвиль і енергія записуючого променя розраховуються таким чином, щоб поглинання лазерного

випромінювання в записуючому шарі приводило до місцевого нагрівання, яке викликає утворення лунки у вигляді раковини між матеріалом підкладки і записуючим шаром, а хімічна реакція в записуючому шарі викликала б локальну зміну оптичних характеристик (наприклад, знебарвлення, вицвітання) барвника, що знаходиться в цьому шарі. В процесі запису на оптичний пристрій з'являється послідовність змінених і незмінених точок, при цьому точки, змінені за допомогою записуючого променя, містять лунки і хімічно змінений барвник.

Для забезпечення зчитування оптичний запам'ятовуючий пристрій знову переміщається щодо лазерного променя уздовж канавки, при цьому інтенсивність даного лазерного променя менше інтенсивності записуючого променя і цей промінь також направляється на відбиваючий шар через підкладку і записуючий шар. Зміни у відображенні лазерного променя (більш сильне або слабке відбиття) в змінених або незмінених точках оцінюються як сигнали зчитування.

В якості базових об'єктів, на основі яких будувалися краунвмісні системи, були обрані найпростіші ненасичені барвники стирилові і бутадієнільні, які подібно стильбену і дифенілбутадієну мають два ароматичних заступника на кінцях пов'язаного ланцюжка зв'язків $C = C$. Ці барвники відрізняються високим квантовим виходом фотоізомеризації. Фотоізомеризація їх супроводжується значною зміною структури хромофора і характеризується високим ступенем фотооборотності.

4.4. Реєстрація оптичної пам'яті в структурі гемоглобіну.

Гемоглобінометр є неінвазійним приладом, який призначений для вимірювання концентрації гемоглобіну в живій тканині та її кровонаповнення (тобто об'ємної долі крові в тканині). Вимірювання проводиться неінвазійно, без пошкодження шкіри та без відбору крові, за допомогою зондуєчого пучка світла.

Особливістю неінвазивного гемоглобінометра є використання опромінювача з оптично непрозорими стінками, який стикається з поверхнею середовища, що розсіює. У цьому випадку випромінювання, відбите внаслідок відмінності коефіцієнтів заломлення, що розсіює, і середовища опромінювача, не потрапляє у фотоприймач. У фотоприймач потрапляє тільки складова зворотного потоку

випромінювання, викликана розсіюванням фотонів структурними елементами середовища, що розсіює (молекулами, оптичними неоднорідностями).

На основі методик проведення державної метрологічної атестації (ДМА) неінвазивного гемоглобінометра був визначений діапазон концентрацій 80-200 г/л і межа відносної похибки вимірювань $\pm 10 \%$. Однак цей діапазон відповідає концентрації в крові, а не в біотканині, тому такий прилад вимагає взяття проб крові. У даній роботі було запропоновано вимірювати концентрацію гемоглобіну в біотканині, рівень якої значно нижче ($0,5 \pm 2$ г/л) і залежить від кровонаповнення. Тому потрібно створювати нові міри гемоглобіну для виконання відповідної ДМА, яка відповідає діапазону концентрації гемоглобіну в біотканині. Як міри гемоглобіну використовувались контрольні зразки крові. Для цього був використаний препарат «Para 12 Extend» фірми «Streck» (США). При цьому, використовувались зразки крові з концентрацією гемоглобіну: 0,25; 0,5; 1,0; 1,5 г/л. Розчинником була дейонізована вода марки ДІС, ТУ У 24.5-33320366-006: 2011 від 08.04.2011.

Таким чином для калібрування використовувався діапазон $0,25 \pm 1,5$ г/л, який відповідає концентрації гемоглобіну для біотканини зап'ястя людини.

Для приготування калібрувальних розчинів використовували формулу (4.1):

$$V_{ст} = V_{кал} \frac{C_{кал}}{C_{ст}}; \quad (4.1)$$

де $V_{ст}$ – обсяг стандартного розчину гемоглобіну, $V_{кал}$ – обсяг каліброваного розчину (робочий об'єм кювети), $C_{кал}$ – його концентрація, $C_{ст}$ – концентрація стандартного розчину гемоглобіну.

4.4.2. Особливості взаємодії лазерного випромінювання з пептидними структурами і реєстрація їх стану фотоплетизмографом.

На основі реєстрації та аналізу оптичних сигналів створено дослідні зразки фотоплетизмографів – приладів для вимірювання сигналів пульсуючої артеріальної крові, тобто пульсової хвилі в різних ділянках тіла людини. Вимірювання проводиться неінвазивно за допомогою зонduючого пучка світла, без пошкодження шкіри та відбору крові. В результаті державної метрологічної атестації отримано гра-

дуювальну криву як залежність відносного коефіцієнту оберненого світлорозсіювання від розмаху амплітуди пульсової хвилі.

Дослідження пульсу в різних ділянках тіла і зокрема в мікроциркуляторному руслі становить великий інтерес для лікарів. Фотоплетизмограф це плетизмовазограф, вимірювання в якому здійснюється цифровою оцінкою за зміною оптичної густини досліджуваної ділянки тіла або органу. Вказаний прилад, призначений для діагностики і локальної точкової реєстрації зміни оптичної густини досліджувальної ділянки тіла людини за допомогою двох монохроматичних джерел у червоних областях спектра світла і оптоелектричного перетворювача відбитого світла. Опромінювач та оптоелектричний перетворювач розташовані в одному корпусі, який представляє собою оптичну головку. Прилад дозволяє аналізувати досить тривалі відрізки записів пульсу, що в свою чергу дозволяє відслідковувати та давати цифрову або кількісну оцінку окремих компонентів пульсових кривих, які носять самостійний характер. Отримана таким чином інформація надходить у пам'ять персонального комп'ютера.

4.5. Висновки.

1. Досліджено молекулярні запам'ятовуючі структури з надвисокою щільністю запису інформації, які майже не мають втрат енергії на виконання однієї логічної операції, а також дозволяють досягати масового паралелізму. Гібридні системи збереження й обробки інформації, що об'єднують властивості твердотільних ЕОМ і молекулярних обчислювальних систем, можуть бути ефективно використані в різних галузях науки і техніки, насамперед, в процесах обробки зображень.

2. Досліджена технологія запису і зчитування інформації на світлочутливому матеріалі молекулярного носія пам'яті, яка дозволяє забезпечити максимальну швидкість доступу до даних. Це досягається за рахунок того, що оброблюваний масив даних кодується в один великий блок даних, що, у свою чергу, записується усього за одне звертання. Якщо врахувати, що така запам'ятовуюча система для обробки інформації не містить частин, що рухаються, і доступ до сторінок виконується паралельно, то запам'ятовуючий пристрій у цілому може дозволити зберігати інформацію об'ємом у десятки терабайт.

3. Розроблена молекулярна пам'ять, яка має певні переваги в порівнянні з традиційною напівпровідникової пам'яттю. Вона заснована на пептиді, що виробляється у великій кількості і за невисокою ціною. Система може функціонувати в більш широкому діапазоні температур, ніж існуюча напівпровідникова пам'ять, а функціонування запам'ятовуючого пристрою є енергонезалежним.

4. Розроблено запам'ятовуючий пристрій на основі оптичної нанопам'яті, який включає в себе органічне молекулярне запам'ятовуюче середовище і набір оптичних засобів для переведення вказаного середовища з одного стану в інше, а також містить молекулярне запам'ятовуюче середовище на основі краунвмісного стирилового барвника.

5. Досліджено функціонування та реєстрацію оптичної пам'яті в структурі пептиду гемоглобіна. Показано можливості приладу фотоплетизмографа, призначеного для діагностики і локальної точкової реєстрації зміни оптичної густини досліджуваної ділянки тіла людини за допомогою двох монохроматичних джерел у червоних областях спектра світла і оптоелектричного перетворювача відбитого світла.

РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЮВАННЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ МОЛЕКУЛЯРНОЇ ПАМ'ЯТІ.

5.1. Дослідження молекулярної пам'яті на моделях синаптичних структур з використанням роботи нейронечітких мереж.

Запозичення архітектурних принципів біосистем призвело до розробки теорій нейронних мереж і нечітких множин із застосуванням останніх в технічних системах. На основі методів нечітких обчислень, які ґрунтуються на знаннях експертів, вирішуються завдання в умовах неповної достовірності та невизначеності інформації, а також виконуються розподілені обчислення при вирішенні нечітких і важко формалізованих завдань. Увагу розробників інформаційних технологій (ІТ) і нейронних мереж (НМ) при цьому було звернено на природній паралелізм НМ в біосистемах в порівнянні з послідовними обчисленнями, властивими більшості відомих систем ІТ. Важливими чинниками, що сприяють поширенню нейромережевих обчислень, є такі властивості НМ, як адаптивність, висока інформаційна захищеність, здатність виділення і класифікація прихованих в інформації знань. Як відомо [5.1], біосистеми володіють багаторівневою ієрархічною системою життєзабезпечення, реалізованою з використанням комплексу механізмів інформаційної надмірності, надійності і імунітету.

Основним механізмом реалізації адаптивних властивостей можна вважати здатність нечіткого розподіленого інформаційного поля нейронної мережі до накопичення інформації у вигляді знань в процесі навчання.

Другим за важливістю механізмом з точки зору адаптивної моделі є нечіткий логічний висновок, який базується на нечіткому представленні інформації в НМ і дозволяє використовувати досвід експертів, матеріалізований у вигляді системи нечітких предикатних правил, для попереднього навчання нейронечіткої мережі. Можливість відображення системи нечітких предикатних правил на структуру НМ і подальше її навчання дозволяють не тільки усунути суперечливість вихідної системи нечітких предикатних правил, а й дає можливість проаналізувати сам процес логічного висновку з метою подальшого уточнення існуючої або синтезу нової системи нечітких предикатних правил адаптивної НМ.

Третім механізмом, необхідним для реалізації адаптивних НМ, є здатність нейронних і нейронечітких мереж до класифікації і кластеризації. Розглянемо алгоритм нечіткого логічного висновку при обробці вхідного образу в нечітких НМ. Нечіткі НМ поєднують переваги нейромережових НМ і нечітких логічних систем, що спираються на апіорний досвід у вигляді заданої системи нечітких предикатних правил. Механізм нечітких висновків, заснований на базі знань, формується фахівцями предметної області у вигляді системи нечітких предикатних правил виду (5.1):

$$\begin{aligned} \Pi_1 : \text{якщо } x \in L_1, \text{ то } y \in B_1, \\ \Pi_2 : \text{якщо } x \in L_2, \text{ то } y \in B_2, \\ \Pi_n : \text{якщо } x \in L_n, \text{ то } y \in B_n, \end{aligned} \quad (5.1)$$

де x і y , відповідно, вхідна змінна і змінна виведення, а L_i і B_i - функції приналежності семантичних даних.

Нечітке відношення $R = L \wedge B$ відображає знання експерта $L \wedge B$ у вигляді причинного відношення передумови і укладення, де операція \wedge відповідає нечіткій імплікації. Відношення R можна розглядати як нечітку підмножину прямого добутку $X \times Y$ повної множини загроз X і механізмів захисту Y , а процес отримання нечіткого результату виведення B по передумові L і знань $L \wedge B$ - у вигляді композиційного правила: $B = L \cdot R = L \cdot (L \wedge B)$, де \cdot - операція, наприклад, max-min- композиції [5.2].

Логічний висновок, як правило, включає наступні етапи [5.3]:

1) Введення нечіткості (fuzzification): за функціями приналежності, заданими на області визначення вхідних нечітких правил (НП), виходячи з фактичних значень НП, призначається ступінь істинності для кожного правила;

2) Логічний висновок: за ступенем істинності вхідних образів формуються висновки по кожному з правил, що утворюють нечітку підмножину для кожного фрагмента НМ;

3) Композиція: отримані на етапі 2 нечіткі підмножини для кожного етапу висновку об'єднуються з метою формування нечіткої підмножини для всіх етапів висновку (за всіма правилами);

4) Приведення до чіткості (defuzzification): зводиться до перетворення нечіткого набору висновків за всіма правилами в чітке значення підсумкової НМ.

Розглянемо етапи логічного висновку для системи нечітких правил (5.2):

$$\begin{aligned} \Pi_1 : & \text{якщо } x \in A, \text{ то } w \in D, \\ \Pi_2 : & \text{якщо } y \in B, \text{ то } w \in E, \\ \Pi_3 : & \text{якщо } z \in C, \text{ то } w \in F, \end{aligned} \quad (5.2)$$

де x, y і z - вхідні НП, що відповідають відомим вхідним образам, w - НП виведення, яке відповідає підсумковому висновку системи, а A, B, C, D, E, F - функції приналежності семантичних даних.

Спочатку на підставі значень безперервних змінних по семантикам A, B, C знаходяться ступені істинності $a(x_0) = A(x_0)$, $a(y_0) = B(y_0)$, і $a(z_0) = C(z_0)$ а $(x_0) = A(x_0)$, $a(y_0) = B(y_0)$, і $a(z_0) = C(z_0)$ вхідного образу для кожного з нечітких предикатних правил. На другому етапі операцією \min у відповідності зі ступенем істинності $a(x_0)$, $a(y_0)$, і $a(z_0)$ видаляються верхні частини семантик D, E і F , формуються висновки по кожному з правил, які створюють нечітку підмножину для кожного вхідного образу. На третьому етапі операцією \max проводиться об'єднання усічених семантик і формування комбінованої нечіткої підмножини, що описується семантикою (w) і відповідної логічного висновку для вихідної змінної w підсумкового висновку системи ІТ. На четвертому етапі визначається значення вихідної безперервної змінної, наприклад, з використанням центроїдного методу знаходиться центр ваги w_0 для кривої (w) [5.1].

У механізмі класифікації висновків доцільно використовувати поєднання можливостей НМ і нечіткої логіки. Нейронні мережі і системи з нечіткою логікою мають специфічні особливості: з одного боку, можливість навчання НМ, а з іншого, процес вирішення завдань системами з нечіткою логікою прозорий для пояснення отриманих висновків. Об'єднання двох підходів в нечітких НМ дозволяє поєднувати переваги нейромережових і нечітких логічних систем, що спираються на апріорний досвід фахівців. Як впливає з досвіду розробки нечітких НМ [5.2] для цілей класифікації реалізують нейронечіткі мережі, які вирішують задачу віднесення нечіткого

вхідного вектора до чіткого класу, а також нейронечіткі мережі, які застосовують побудови нечітких систем нечітких правил виводу.

Розглянемо підхід до організації нейронечіткого класифікатора, що використовує механізм нечіткого логічного висновку для класифікації вихідних висновків за нечіткими векторами вхідних образів нейронної мережі з нечіткими зв'язками [5.4]. На рис.5.1 приведена схема прогнозного пошуку образу з використанням нейронечітких мереж.

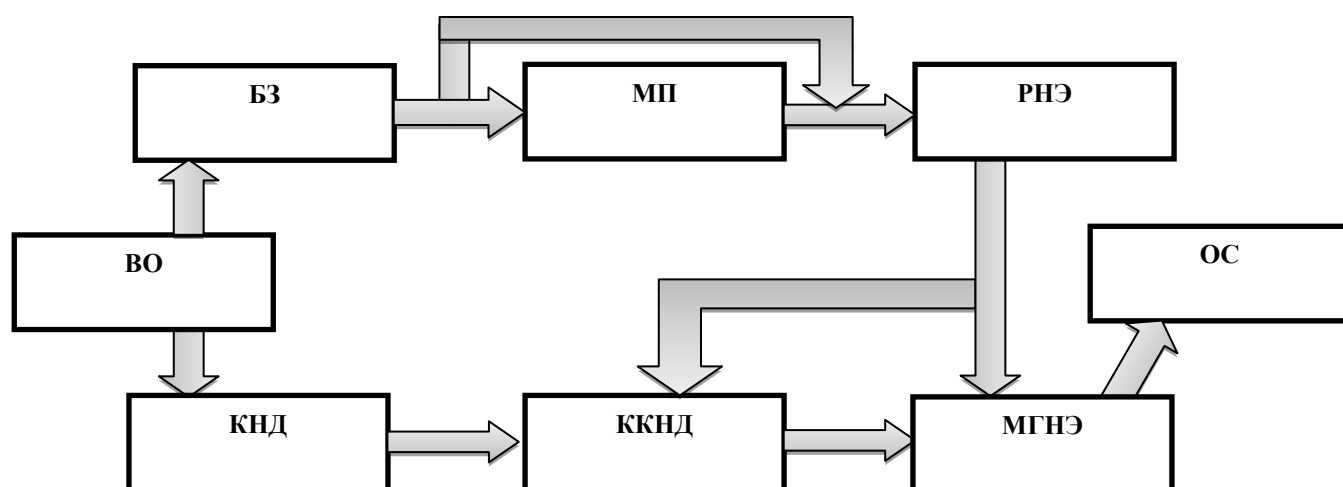


Рис.5.1. Схема прогнозного пошуку образу з використанням нейронечітких мереж: БЗ - бази знань існуючих кластерів даних, БО - вхідні образи, КНД - кластери з нечіткими даними, МП - методи пошуку або прогнозування, РНЭ - поділ нечітких елементів на групи, ККНД- класифікатор кластерів з нечіткими даними, МГНЭ - моделі груп з нечіткими елементами, ОС - відповідь системи у вигляді знайденого образу.

В роботі нейронечіткого класифікатора (рис.5.1) використовуються наступні етапи. На першому етапі здійснюється формування навчальної вибірки, яка складається з кроків: 1.1. Порівняння вхідного образу з базою знань існуючих кластерів даних; 1.2. Формуємо з бази знань (1.1) деяку кількість елементів шляхом створення випадкової вибірки; 1.3. Досліджуємо характер нечіткої інформації, яка піддається прогнозуванню; 1.4. Використовуючи отримані оцінки по (1.3) і фраг-

мент бази знань (1.2) формуємо навчальну вибірку; 1.5. Повторюємо кроки 1.2-1.4 до тих пір, поки обсяг навчальної вибірки не буде достатнім (число екземплярів більше деякого заданого числа прогнозних елементів).

Етап 2. Створення керуючого елемента у вигляді класифікатора кластерів з нечіткими даними: 2.1. Визначаємо групи елементів масиву з нечіткими даними з існуючими кластерами даних в (1.1); 2.2. Будуємо і навчаємо керуючий елемент - класифікатор прогнозних елементів на основі класифікатора кластерів з нечіткими даними. Основна ідея класифікатора полягає в тому, щоб за відомою частиною примірника, визначити ту групу елементів (2.1), до якої належить досліджувана група в даному випадку. Для навчання використовуємо масив випадкової вибірки (1.2).

Етап 3. Навчання керуючого елемента у вигляді класифікатора кластерів з нечіткими даними. Для навчання використовуємо частину вибірки, сформованої на етапі 1.2 і відповідну групу прогнозованих елементів,

Етап 4. Прогнозування значень досліджуваних кластерів інформації. Зазначений кластер подається на керуючий елемент, реалізований на основі класифікатора. Керуючий елемент приймає рішення про те, яку групу даних, отриманих в 1.4, використовувати для цього кластера.

5.2. Підхід до моделювання пам'яті через навчання знаходження агентом необхідної онтології в осередках пам'яті.

Однією з основних переваг мультиагентних систем, завдяки якій їх дослідження стрімко розвивається, є висока мобільність і автономність агентів. Високий ступінь мобільності накладає зобов'язання на більшість властивостей агента, зокрема на такий його аспект, як уявлення про навколишнє середовище і власні функції. У більшості випадків ці уявлення описуються деякою онтологією, тобто ієрархією взаємопов'язаних понять, вбудованою в агента, якою він маніпулює при виконанні практично будь-яких дій, які зачіпають зовнішнє середовище, а також у багатьох випадках і при внутрішньому аналізі ситуації [5.5].

Онтологія сама по собі є досить незалежним об'єктом. Нерідко онтологія розглядається як багаторівневий об'єкт, що складається з декількох високорівневих

онтологій, доповнених специфічними для даної області поняттями. Онтологія, як правило, визначає специфіку певної галузі діяльності і динамічно розвивається разом з цією областю.

5.3. Механізми специфічної молекулярної системи пам'яті рецептивних кластерів.

Початком вивчення специфічного носія пам'яті послужили роботи [4.4], де показано, що утворення слідів пам'яті супроводжується зміною структури РНК з подальшим утворенням нових пептидів. Надалі було показано, що РНК бере участь у передачі специфічного коду.

Як сховище інформації виступає ДНК. Однак в основі довготривалої пам'яті лежать не тільки перетворення на рівні окремих клітин, але і на системному рівні. Ці перетворення забезпечуються медіаторними системами мозку, що об'єднують різні структури, які беруть участь в операціях зйомки і відтворення слідів процесів в розподілену динамічну систему пам'яті.

При дослідженні молекулярної пам'яті доводиться стикатися з парадоксом - як може пам'ять зберігатись в мозку протягом багатьох років, якщо середня тривалість життя будь-якого білка становить всього лише добу або близько того. Було запропоновано 3 механізми [4.4], за допомогою яких це може здійснюватися: (1) сигнальні шляхи, замкнуті в петлю з позитивним зворотним зв'язком (білок, позитивно регулює власну експресію), (2) формування стабільних пріоноподібних білкових конгломератів, (3) епігенетика, тобто ковалентні модифікації ДНК.

Для розуміння роботи інформаційного ключа до пам'яті мозку розглянемо реакції нейрона на конформаційні переходи рецепторів. Взаємодіючи з медіаторами, мембраною, іонними каналами і між собою, рецептори утворюють на плазматичній мембрані нейронів мозаїки іонотропних і метаботропних рецептивних кластерів (ІРК і МРК). Їх функції - трансмембранна передача сигналів - залежать від конформаційної рухливості рецепторів і локалізації мозаїчних елементів ІРК і МРК щодо безлічі синапсів. Залежно від мембранних потенціалів МРК функціонують як бістабільні (W) або моностабільні (R) молекулярні тригери, що дозволяє відповідно записувати і відтворювати інформацію. Досліджено формування ІРК і МРК і їх

реакції на електричні та хімічні стимули. Спільна їх дія переводить МРК в третю конформацію, де адгезія паралізує рецептори. У ІРК таке зменшення конформаційної рухливості інактивує провідність каналів, а в МРК - формує елемент енграми. Конформаційні властивості МРК пояснюють механізми короткочасної і довготривалої пам'яті і стратифікацію енграм за віком. Разом з синаптичним оточенням безліч МРК утворює синаптично адресне запам'ятовуюче середовище, де запис і відтворення імпульсних текстів закономірно чергуються завдяки варіативності викликаних потенціалів і результуючої просторової рухливості R / W режимів.

Розглянемо фізичну реалізацію синаптично адресного запам'ятовуючого середовища при вивченні пресинаптичного асоціативного навчання (рис.5.2).

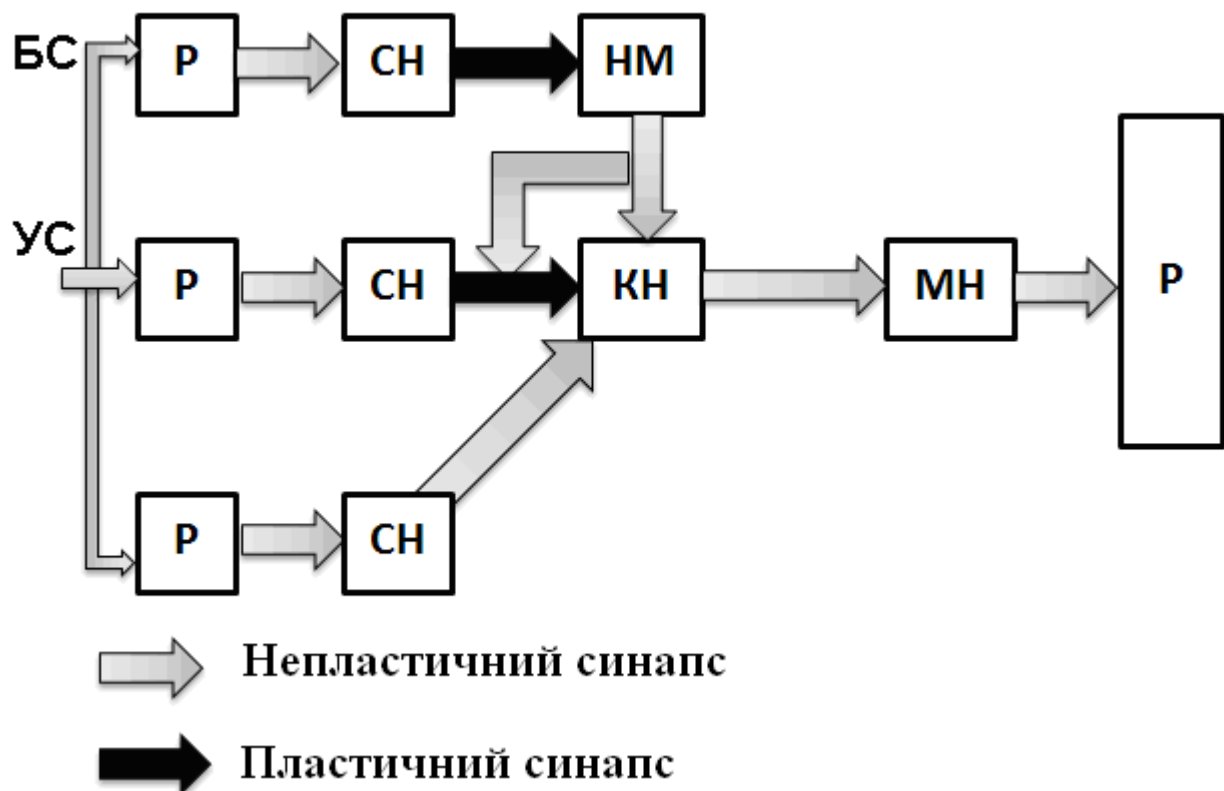


Рис. 5.2. Схема фізичної реалізації синаптично адресного запам'ятовуючого середовища: УС - умовний стимул, БС - безумовний стимул, Р-рецептори, СН – сенсорні нейрони, НМ - модулюючий нейрон, КН - командний нейрон, МН – мотонейрони, р-рефлекс; чорний кружок - пластичний синапс, світлий - непластичний синапс.

З рис.5.2 видно, що реалізація синаптично адресного запам'ятовуючого середовища при пресинаптичному асоціативному навчанні викликає взаємодію мозкових структур [5.6].

Сформована у фронтальній корі програма дії надходить в базальні ганглії, де шляхом взаємодії з «командою» тім'яної кори вона «вписується» в просторові координати (рис.5.3).



Рис. 5.3. Концептуальна модель організації програмованої відповіді: Р- рецептори, ПД - предетектори, Д - детектори, КН - командні нейрони, МН - мотонейрони, ЛМ - локально-модулюючі нейрони, ГМ - генералізовано-модулюючі нейрони, ЕФ - ефектор.

Як видно з рис.5.3 модулюючі нейрони складають особливий клас елементів в структурі рефлекторної дуги асоціативного автоматизму. Вони отримують сигнали із зовнішнього середовища і внутрішніх органів, але виконують функцію регуляції тонуусу рефлекторної діяльності мозку. Спеціальним механізмом регуляції збудливості є нейрони з модулюючою функцією (з активуючою і інактивуючою

функцією), які беруть на себе функцію контролю і керування діяльністю командних нейронів наступного спадного рівня, які запускають комплекси рухів. Вихідні (командні) нейрони рухової кори запускають дискретні рухові акти через залучення в реакцію популяцій моторних нейронів стовбурових і спінальних рівнів. Така ієрархічна організація рухових систем керування і запуску реакцій «зверху вниз» полегшує реалізацію складних програм рухів [5.7]. Принцип системної організації командних нейронів дозволяє при обмеженому наборі моторних елементів реалізувати складні акорди рухів.

З метою вивчення механізмів пам'яті проаналізуємо модель кластера метаботропних рецепторів. Його конформаційні переходи подібні перемиканням молекулярного тригера, керованого хімічними і електричними стимулами. Один з конформаційних переходів внутрішньоклітинно посилюється: синтезується другий посередник і ініціюється метаболічний процес генерації ендogenous («спонтанного») спайка. Метаботропні рецептори, локалізовані за межами синапсів, сприймають обидва типи стимулів: електричні - продукуються субсинаптично навколишніми синапсами, а хімічні - поширенням медіаторів за границі синапсів, тобто в нейроногліальних щілинах. Можна уявити роботу синапсів через вивчення функцій стабільних синаптичних структур. Вони чудово адресують енграми, але не є носієм інформації. Цю функцію виконують метаботропні рецептори. За межами синаптичної щілини вони утворюють кластери. Їх конформаційні стани керуються різними поєднаннями хімічних і електричних стимулів, які продукуються навколишніми синапсами. Змінюючи конформаційні стани, рецептивні кластери керують метаболізмом клітини і її «спонтанною» активністю, а конформаційний гістерезис дозволяє кластерам виконувати функції пам'яті [5.8-5.10].

5.4. Вивчення процесів формування елементів образу.

До цих пір ми розглядали розпізнавання образів, не даючи визначення слову "образ" (pattern). Відповідно до одного з визначень [5.11], образ - це конфігурація з декількох елементів, що становлять певне ціле. Подібне визначення має на увазі, що будь-який образ можна розбити на більш прості елементи і що при возз'єднанні цих елементів знову виникає образ. Загалом концепція елементів, або елементарних оз-

нак, зводиться до того, що з відносно невеликої безлічі більш простих частин, узятих в різних поєднаннях, можна створити всі образи, що входять в якусь більш потужну множину (наприклад, безліч друкованих букв алфавіту).

Інший приклад безлічі образів, які можна створити з простіших елементів ("ознак"), - це усне мовлення. Мова складається з основних звукових одиниць, так званих фонем і аналогічних буквам, з яких складаються слова, що пред'являються візуально. Фонему можна визначити як такий звук, який, змінюючись як окремий елемент, може змінити зміст слова. Все це означає, що ми можемо вважати фонему одиницею мови, якоюсь абстракцією, що об'єднує безліч подібних звуків. Виявлення набору ознак, які можна використовувати в різних поєднаннях для отримання фонем (подібно до того як можна використовувати прямі і криві лінії і кути в якості основи для отримання друкованих букв) - дуже важка проблема, але все ж було зроблено кілька спроб розв'язати цю проблему. Один з методів заснований на тому, щоб досліджувати механізм артикуляції звуків і спробувати описати кожен звук мови відповідно до того, як людина використовує при його проголошенні свій мовний апарат.

Однією з теоретичних моделей, заснованих на аналізі ознак, є модель "Пандемоніум" [5.12]. Ця модель представлена на рис. 5.4.

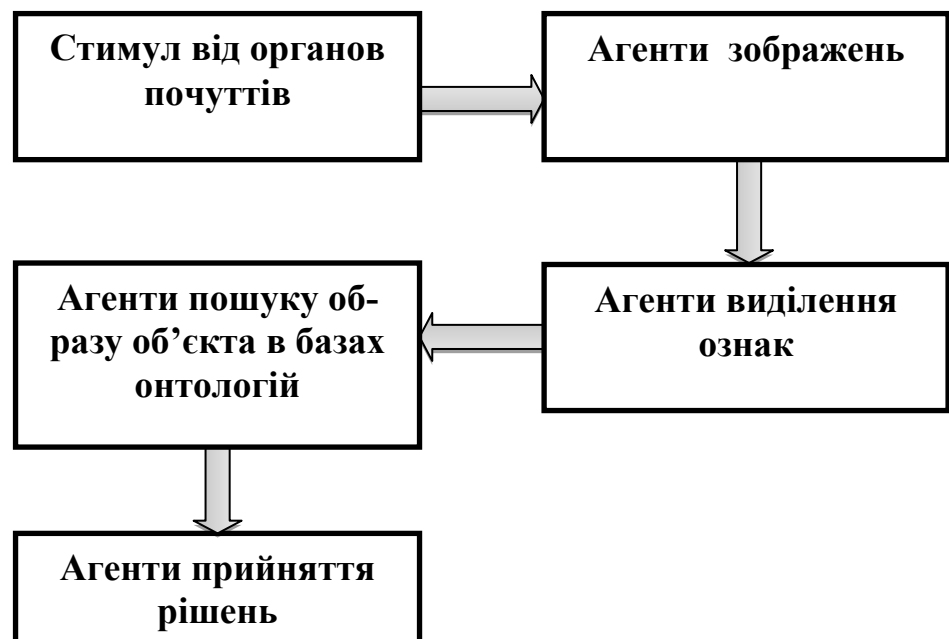


Рис.5.4. Схема етапів виділення ознак при розпізнаванні образів.

Процес розпізнавання образів складається з декількох етапів або рівнів. На кожному рівні є загін "агентів", які виконують ту чи іншу роботу, пов'язану з розпізнаванням пред'явленого образу.

На першому рівні діють агенти зображення, які зайняті тим, що ми називаємо сенсорною реєстрацією, тобто реєструють стимул як якусь подію на сенсорному рівні. Потім ця подія аналізується агентами виділення ознак, які розбивають первинне зображення на складові елементи. Кожен такий агент або демон [5.12] шукає в зображенні лише одна ознаку - певну пряму, розташовану під певним кутом, або криву - і реєструє його, якщо знаходить.

За агентами виділення ознак стежать агенти впізнання, які відповідають перелікам ознак. Перелік, наявний у кожного з таких агентів, відноситься до одного певного образу, і робота цього демона-агента полягає в тому, щоб "кричати", або ж сигналізувати, тим голосніше, чим більше "своїх" ознак він знайде серед тих, які були виділені в результаті аналізу ознак.

Нарешті, на самому верхньому рівні сидить агент-демон прийняття рішення (процес прийняття рішення). Він повинен встановити, який з агентів впізнання кричить голосніше за всіх, і в результаті розпізнати образ.

Існує явна аналогія між стимулами, які приводять в дію спеціалізовані нейрони, і тим, що ми називаємо тут ознаками. Можна припустити, що у людини теж є клітини, які розряджаються при появі тих чи інших елементів сенсорного матеріалу і виконують в зоровій системі роль аналізаторів ознак. Мабуть, деякі клітини реагують незалежно від таких специфічних характеристик стимулу, як довжина. Вони могли б служити детекторами більш абстрактних ознак (наприклад, виявляти наявність лінії будь-якої довжини, розташованої під певним кутом). Можливо, це допомогло б зрозуміти, чому нам вдається розпізнавати образи незалежно від їх величини і т.п.

З усього сказаного видно, що є дані як на користь формування прототипів, так і на користь аналізу ознак. Ми переконалися також у тому, що багато в розпізнаванні образів піддається поясненню за допомогою обох моделей, але в той же час для вирішення цілої низки проблем необхідна побудова нових моделей.

Розглянемо можливості обробки людиною одержуваної інформації структурами мозку і зв'язок їх роботи з процесами мислення. Проаналізуємо докладніше, що саме представляється у вигляді даних і результатів при обробці інформації людиною. Головною функцією обробки інформації є розвиток на основі одержуваної ззовні інформації знань, тобто функціонування деякої кодуючої системи, що дозволяє раціонально зберігати і ефективно використовувати інформацію. Друга функція розглянутого пристрою відноситься до використання знань і обробки на основі наявних знань одержуваної ззовні інформації.

Характеристики людського мозку, особливо в частині швидкості обробки інформації, значно поступаються можливостям сучасних ЕОМ, однак розумові процеси, засновані на використаних мозком принципах і механізмах дозволяють людині ефективно мислити і творчо створювати і освоювати нові знання.

У дослідженні інформаційної моделі людини важливі її основні характеристики роботи мозку людини (табл.5.1). Наведені в табл.5.1 дані по оцінці параметрів і характеристик мозку учнів дозволяє говорити про специфічні методи обробки інформації в мозку людини [5.9,5.10].

Табл.5.1. Інформаційна модель роботи мозку людини.

№ п/п	Параметр обробки інформації	Величина
1	Швидкість передачі інформації по каналах введення - виведення	30 біт/сек;
2	Максимальна кількість інформації, яка накопичується до 50 років	10 Мбіт;
3	Число уявних порівнянь в 1 сек в процесі інтелектуальної діяльності	18
4	Число адрес, які можна одночасно зберігати в короткостроковій пам'яті	7
5	Час доступу до адресованого фрагменту інформації в короткостроковій пам'яті	2 сек
6	Швидкість передачі даних з довгострокової пам'яті в короткочасну для послідовності двійкових символів фрагмента	3 елемента/сек;
7	Кількість колірних відтінків, що сприймаються оком	10 млн.

5.5. Використання магнітометра на основі надпровідного квантового інтерферометричного датчика (НКВІД – магнітометра) для вивчення просторової взаємодії термохімічних потенціалів клітини при роботі молекулярної пам'яті.

В результаті просторової взаємодії термохімічних потенціалів клітини можна вибирати необхідні фізичні параметри і способи їх оцінки для діагностики стану біологічно активних точок (БАТ) і відповідних меридіанів, оскільки така оцінка по одній лише електропровідності має свої недоліки.

Для виконання зазначеної діагностики необхідні визначення для вибору основних схем роботи алгоритмів корекції стану фізіологічних систем, тобто прийнятні впливи на БАТ, що враховують основні аспекти такого впливу спочатку на поле термохімічного потенціалу, і вже за допомогою цього інформаційного поля - на фізіологічну систему.

При дії ж сучасних приладів на БАТ не враховується зв'язок найголовніших факторів, а саме: характер ураження меридіана, пов'язаного з БАТ і певного блоком діагностики, напрямом енергії в обраній для впливу БАТ (приплив, відтік), і тип фізичного впливу, а також його параметри (частота, полярність, і т.п.).

Нами використовувався експериментальний зразок приладу, відповідний цим вимогам, який об'єднує, як правильно обраний метод електро-akupунктурної діагностики, так і відповідні способи кореляції слабкими електричними струмами [5.13]. Перспективними є також установки, які одночасно оцінюють для діагностики кілька фізичних факторів, наприклад, поєднання діагностики по провідності в БАТ і по магнітограмі в області цієї ж БАТ, знятої за допомогою НКВІД - магнітометра на основі надпровідного квантового інтерферометричного датчика.

Аналогічним чином більш ефективними, в порівнянні з існуючими, є прилади, що поєднують при впливі на БАТ кілька фізичних факторів, наприклад, слабого електричного струму і променя лазера. Але при проектуванні таких приладів дуже важливо враховувати вищезазначений зв'язок між типом впливу, напрямком енергії в БАТ і характером ураження меридіана, а також можливі наслідки фізичної

взаємодії впливу приладу з просторовим полем термохімічного потенціалу, що породжується роботою ферментних систем організму різного рівня [5.14-5.17].

Спочатку представимо модель виникнення та дії термохімічних потенціалів. Для цього напишемо рівняння загальної теорії відносності щодо потенціалу Гіббса для просторово-подібних координат $(i, j = 1, 2, 3)$ в довільній точці М (БАТ), віддаленої від зон хімічних реакцій, що впливають на неї (у відповідних цій БАТ органах і тканинах) відповідно до виразу (5.3):

$$\alpha G_{ij} = R_{ij} - \frac{1}{2} R g_{ij}. \quad (5.3)$$

де G_{ij} – тензор, що відповідає потенціалу Гіббса; g_{ij} – метричний тензор; R_{ij} – тензор Річчі.

Продиференціюємо (5.3) за часом. Структуру тензора G_{ij} , що відповідає потенціалу Гіббса, будемо розглядати подібно структурі тензора енергії-імпульсу для потоку мас (5.4) [5.18]:

$$T_{ij} = \mu_i u_j, \quad (5.4)$$

де μ_k - відповідна щільність проекції імпульсу, μ - щільність мас. При цьому просторово-подібні компоненти тензора G_{ij} повинні бути пропорційні добуткам проекцій швидкостей зміни термохімічного потенціалу. При відсутності в точці М значної власної біохімічної активності ці швидкості можна вважати квазіпостійними, тому можна покласти, що $\partial G_{ij} / \partial t = 0$. Тут також враховується, що просторовий вплив віддалених зон біохімічних реакцій малий в порівнянні з потенціалом Гіббса безпосередньо в точці М. Фактично ми обмежуємося аналізом квазіпостійної складової при взаємодії термохімічних потенціалів. Таким чином, маємо (5.5):

$$\frac{1}{2} R \left(\frac{\partial g_{ij}}{\partial t} \right) = \frac{\partial R_{ij}}{\partial t}. \quad (5.5)$$

Метричний тензор g_{ij} , як відомо [5.18], являє собою скалярний добуток ортів репера, який відповідає точці М криволінійної системи координат. Зміни в часі компонент метричного тензора (враховуючи, що вихідне рівняння (5.3) записано щодо компо-

мент потенціалу Гіббса) означає, що відповідним чином буде змінюватися як сам потенціал Гіббса, так і сили між- і внутрішньомолекулярної взаємодії. Останнє впливає з того, що зміни довжин в локальній системі координат (і поява відповідних прискорень) фактично рівносильно появі додаткових сил, які і призводять до змін сил взаємодії між молекулами і їх частинами. Поява таких сил викликана впливом на точку М зон хімічних реакцій, віддалених від неї.

Але зміна сил взаємодії призводить до того, що повинна відповідним чином змінюватися швидкість дисоціації молекул на іони. Кількість іонів, і відповідно електропровідність в точці М, як і електропровідність електролітів, як відомо [5.19], прямо пропорційна ступеню електролітичної дисоціації. Крім того, поява додаткових змін метричного тензора в точці М на молекулярному рівні, означає появу і додаткових добавок до енергії молекул (відповідно до інтерпретації основного рівняння (5.3)). Таким чином, і температура, і електропровідність в точці М будуть залежати і від значень метричного тензора, обумовлених просторовим впливом термохімічного потенціалу (5.6):

$$\frac{dT}{dt} = f_T(T, g); \quad \frac{d\lambda}{dt} = f_\lambda(\lambda, g). \quad (5.6)$$

Тут g - визначник метричного тензора, T - температура, λ - електропровідність, t - час. Лінеаризуючи (5.6) в зоні деякої точки t_0 , отримуємо:

$$\frac{dT}{dt} = aT + bg; \quad \frac{d\lambda}{dt} = c\lambda + dg. \quad (5.7)$$

З (5.7) безпосередньо видно, що метричний тензор є керуванням [5.20] як для температури, так і електропровідності в точці М. Це пояснює схему механізму, за допомогою якого слабкий інформаційний сигнал може впливати на поведінку фізичної системи.

Розглянемо тепер фізичну інтерпретацію зміни в часі тензора Річчі - R_{ij} . Останній є згортою тензора кривизни. А геометричний сенс тензора кривизни, в свою чергу, полягає в тому [5.21], що його компоненти пропорційні кутам відхилення від власного положення вектора паралельно обнесеного по замкнутому нескінченно малому контуру. Тензор кривизни в разі потенціалу Гіббса відмінний

від нуля хоча б тому, що в тепловому русі молекул присутня оберտальна частина. Однак в зоні хімічної реакції, яка просторово впливає на точку М, слід очікувати і наявності інших «більш макроскопічних» обертальних компонент в термохімічному потенціалі, які можуть з'явитися в результаті того, що зона хімічної реакції займає значний обсяг у порівнянні з розміром окремої молекули і часто супроводжується таким явищем як просторова когерентність. Одним з чинників, що створюють таку когерентність, може служити магнітне поле Землі, силові лінії якого орієнтують в одному напрямку спіни молекул.

Таким чином, зміни тензора кривизни (і відповідно тензора Річчі) в точці М тягнуть як зміни обертальної частини термохімічного потенціалу, так і зміни інших полів, що мають ротор, відмінний від нуля, зокрема - магнітного поля. В цьому випадку для напруженості магнітного поля є справедливим рівняння, аналогічне (5.6):

$$\frac{dH}{dt} = f_H(H, R). \quad (5.8)$$

Обертальна частина теплового руху відповідає випромінюванню в міліметровому діапазоні електромагнітних хвиль, а хаотичний броунівський тепловий рух генерує випромінювання в інфрачервоному діапазоні.

Тому зміни метричного тензора породжують відповідні коливання електропровідності і теплового випромінювання в інфрачервоному діапазоні в точці М. А зміни тензора кривизни призводять до відповідних коливань магнітного поля і інтенсивності випромінювання в міліметровому діапазоні. Рівняння (5.6), (5.7), (5.8) фактично пророкують лінійну кореляцію в БАТ: між електропровідністю, магнітним полем, випромінюванням в інфрачервоному і міліметровому діапазонах.

Для обробки відповідними програмами в комп'ютер одночасно по різних каналах подавався сигнал з високоточного приладу, що вимірює електропровідність в зоні БАТ, і сигнал зі НКВІДу, орієнтованого на ту ж БАТ (табл.5.2). Кореляція коливань магнітного поля і електропровідності підтверджена за допомогою НКВІД-магнітометра. Результати вимірювань значень електропровідності і магнітного поля в рефлексно-сенсорних модулях тіла людини наведені в табл. 5.2 і були використані

для побудови графіків кореляції коливань магнітного і електричного полів при зазначених вимірюваннях (рис.5.5).

Табл.5.2. Результати вимірювань значень електропровідності та магнітного поля в рефлексно-сенсорних модулях (еквівалентних БАТ) тіла людини.

N умовних точок		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Час, сек		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Елек- тр. потенц. (E, 0-50мВ)	Верх. Знач.	32	36	49	47	35	40	41	41	42	41	35	30
	Сер. знач.	28	32	46	42	33	38	39	39	40	39	33	28
	Ниж. знач.	26	30	43	37	31	36	37	37	38	37	31	26
Магн. поле, (H, 0-150 пТл)	Верх. знач.	107	121	163	156	117	130	137	137	140	137	117	100
	Сер. знач.	97	110	153	140	110	125	130	130	134	130	110	97
	Ниж. знач.	91	102	144	123	103	120	123	123	127	123	103	93

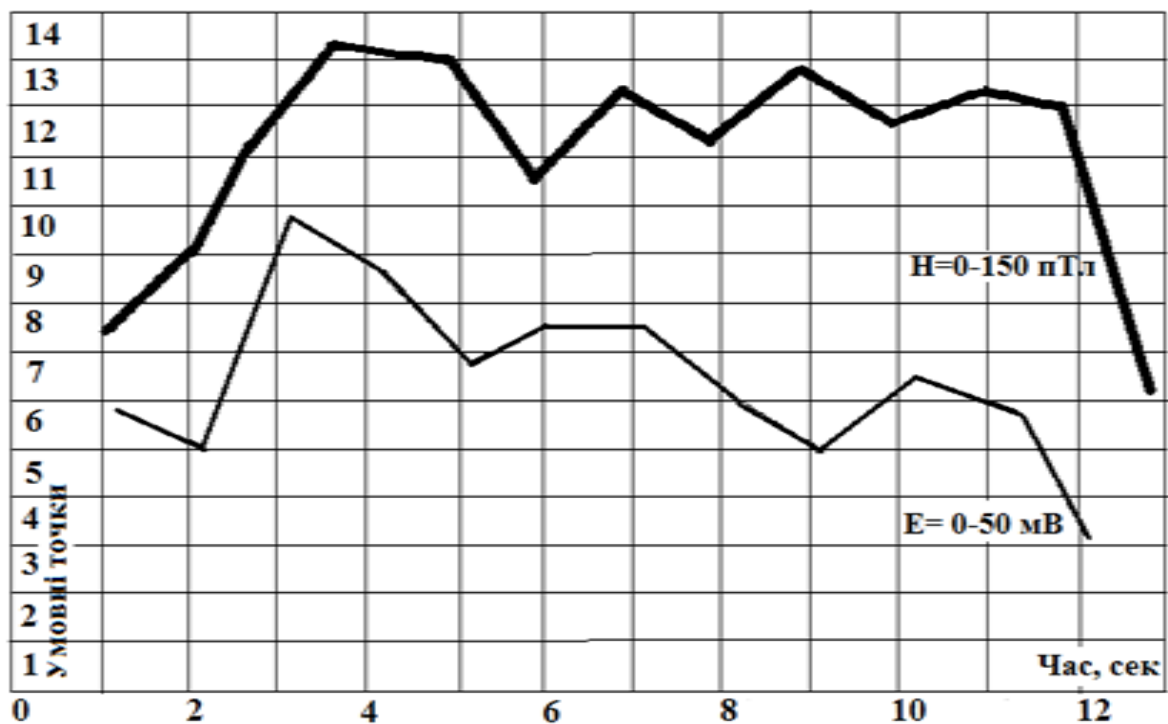


Рис.5.5. Криві кореляції коливань магнітного (верхня крива) і електричних полів (нижня крива) в рефлексно-сенсорних модулях тіла людини.

Можна розглянути процес отримання зазначених вище даних при можливій відсутності взаємодії термохімічних потенціалів. В цьому випадку магнітне поле і його коливання будуть породжуватися виключно струмами в районі точки М, причому тангенціальними круговими струмами (тангенціальними по відношенню до площини датчика магнітного поля [5.22]). Рух електрично нейтральної рідини (крові, лімфи, тощо) магнітного поля не викликає. Причини виникнення струмів в районі точки М наступні: кардіосигнал, потенціал головного мозку, потенціали від напружених (що працюють) м'язів, трансмембранні струми і нервові імпульси в районі точки М.

Провідним по потужності серед перерахованих буде кардіосигнал. Однак кардіосигнал попередньо породжує електричне поле, розподілене по всьому організму. Враховуючи різні значення електропровідності на різних ділянках і різних напрямках, яка до того ж змінюється з часом, електричне поле реалізується струмовим диполем, напрямком якого не завжди збігається з напрямком електричного вектора серця, оскільки об'ємний характер електропровідності в зоні точки М, природно, інший, ніж в зоні серця. З огляду на складання з іншими струмовими диполями, причини виникнення яких вище перераховане, можна очікувати хаотичного сигналу і, найчастіше, взаємного погашення, тобто практичної відсутності власного магнітного поля в точці М, якщо ця точка не знаходиться поблизу зони серця, головного мозку, напружених м'язів або іншого джерела хаотично струмів. Власне, з цих причин для зняття електрокардіосигнала використовують вимірювання не електропровідності, а напруги, причому використовується диференційний (з двох точок) сигнал. Але навіть якщо присутні тангенціальні струми, що створюють магнітне поле, то їх лінійну кореляцію зі зміною провідності в радіальному напрямку при наявності багатьох незалежних джерел електричного поля уявити досить складно. Таким чином, є підстави вважати, що основною причиною виникнення квазіпостійної компоненти магнітограми деякої зони поверхні шкіри (а тим більше, якщо ця зона знаходиться далеко від серця, головного мозку або напруженого скелетного м'яза), повільно змінюється, є взаємодія термохімічних потенціалів на відстані. Оскільки і теоретично (на основі аналізу рівнянь (5.4) - (5.8)), і експери-

ментально на статистичному матеріалі обсягу вибірки в 50 експериментів на різних об'єктах підтверджена кореляція в БАТ електропровідності і магнітного поля (рис.5.5), то магнітограма конкретної БАТ може бути використана як інформаційний сигнал, поряд з іншими, для визначення енергетичного стану фізіологічних систем організму людини.

Складова, яка повільно змінюється, була виявлена раніше в складі магнітоміограми і її поведінка мало вивчено. Більше того, можна вважати, що саме працюючий скелетний м'яз призводить до її появи, хоча ця складова спостерігалася і після роботи м'язів. Однак, як підтверджують експерименти, квазіпостійна компонента присутня в будь-якій зоні і в незалежно від наявності напруги в довколишніх скелетних м'язах корелює з електропровідністю.

Наявність другої кривої просторового поля термохімічних потенціалів при діагностиці та корекції енергетичного стану в вимірюваних БАТ дуже важлива, так як при наявності ознак хвороби буде різною кількісна оцінка кореляції цієї кривої з кривою електропровідності, яка визначається програмно. Розглядаючи закономірності розташування меридіанів і БАТ на них, можна прийти до висновку, що це і є кінцеві точки, що відповідають за ферментативні реакції в різних органах. Просторове поле термохімічних потенціалів запам'ятовує картину таких ферментативних та інших реакцій в тканинах людини і передає їх на БАТ, як би сигналізуючи про можливе насування хвороби. Таким чином і на цьому рівні ми спостерігаємо накладення (розкладання) енергетичних характеристик у часі. БАТ як би є провісниками майбутніх фізіологічних і біохімічних процесів, які можуть настати в результаті порушень енергетичних процесів при синтезі і подієвих феноменах, які програмно розгортаються на різних стадіях життєдіяльності різних фізіологічних і біохімічних систем організму людини.

Використовуючи в даній роботі експерименти із застосуванням надчутливих приладів (НКВІД-магнітометр) ми змогли реєструвати зміну положення в просторі провідних об'єктів. Це підтверджує наш висновок про правильне трактування отримання другої кривої в результаті змін енергетики просторового поля як результату сумарної зміни термохімічних потенціалів.

5.6. Побудова моделі імунної пам'яті для керування комплексом програм підтримки здорового стану людини.

Для створення систем програмного забезпечення супроводу лікувального процесу вельми актуальним є вибір стратегії лікування з урахуванням особливостей стану конкретного хворого. Дослідження фундаментальних і модельних результатів [5.23-5.25] дозволяє на основі моделей взаємодії антигенів і антитіл на різному рівні, аж до внутрішньоклітинного і генетичного, підійти до побудови математичних моделей підтримки здорового стану людини. Основну роль в такому підході відіграє імунна пам'ять в складі імунної системи (ІС) як комплекс програм з керування біо-нано-об'єктами в організмі людини.

У дослідженнях були використані підходи до побудови математичних моделей на основі співвідношення балансу основних біонанооб'єктів, що беруть участь в імунній відповіді. Зважаючи на таку концепцію приділено увагу стратегії роботи програм ІС як реакції на дії різних антигенів і ряду дестабілізуючих факторів. Аналіз роботи програм імунної відповіді в роботі проводиться з урахуванням основних закономірностей і механізмів функціонування ІС.

Необхідність створення систем програмного забезпечення супроводу лікувального процесу невіддільна від розуміння стратегії імунної відповіді. Прийнятний рівень використання такого програмного забезпечення може бути досягнутий на шляху побудови відповідних математичних моделей підтримки стану здоров'я людини на основі реалізації ефективної роботи ІС.

Фундаментальні механізми імунного захисту, сформульовані в клонально-селекційній теорії Ф.Бернета [5.23], дозволяють використовувати для математичного моделювання імунної відповіді основні положення зазначених механізмів: в організмі попередньо існує ненульовий рівень імунокомпетентних клітин зі своїми рецепторами - антитілами, специфічними до всіляких антигенів. Незначна доза антигенів, потрапляючи в організм, починає розмножуватися в клітинах органу мішені, а частина антигенів скидається в кров, де стикається з рецепторами імунокомпетентних клітин - з антитілами, утворюючи комплекси антитіло-антиген, які поглинаються антитілопороджувальними клітинами. Через деякий час після стимуляції в ор-

ганізмі формуються плазматичні клітини, що виробляють антитіла. При цьому уражена частина органу не стимулює вихід плазматичних клітин, а процес регенерації тканин органу- мішені запускається у відповідь на пошкодження.

Наведені вище умови роботи імунної системи узагальнені у вигляді механізму імунної відповіді (рис.5.6).

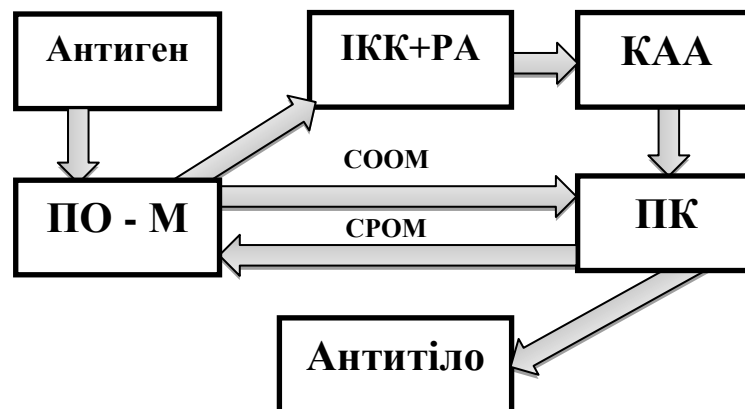


Рис.5.6. Схема роботи імунної пам'яті при імунній відповіді: ІКК+РА- імунокомпетентні клітини з рецепторами-антитілами, КАА - комплекси антиген-антитіло, ССОМ- сигнал про стан органу-мішені (сигнал запуску програми формування плазматичних клітин), СРОМ- сигнал про регенерацію органу- мішені (сигнал запуску програми регенерації органу-мішені).

Відповідно до викладених фактів і уявлень про динаміку імунної відповіді можна виділити змінні моделі, які є безперервними функціями: $V=V(t)$ - концентрація антигенів (патогенів), що розмножуються в ураженій частині органу-мішені; $C=C(t)$ - концентрація антиген-специфічних лімфоцитів (носіїв і продуцентів антитіл) в лімфоїдній тканині; $F=F(t)$ - концентрація антитіл (молекул імунної природи - імуноглобулінів, рецепторів імунокомпетентних клітин, що нейтралізують антигени в крові; $m(t)$ - відносна характеристика ураженого органу.

В роботі [5.24] математична модель інфекційного захворювання будується на основі співвідношень балансу для кожної з залежних змінних, в припущенні, що "організм" описується однорідним замкнутим об'ємом, в якому всі компоненти про-

цесу рівномірно розподілені. З огляду на зміну чисельності клітинних популяцій, що беруть участь в процесі імунної відповіді на відрізку часу $[t^0, T]$, де $t^0 = 0$ в момент інфікування, з урахуванням пошкодження і регенерації органів, можна перейти до системи нелінійних диференціальних рівнянь з запізнілих аргументом і розривною правою частиною, записаних в нормальній формі Коші (5.9) :

$$\begin{aligned}\frac{dV}{dt} &= \beta V - \gamma FV \\ \frac{dF}{dt} &= \rho C - \eta \gamma FV - \mu_f F \\ \frac{dC}{dt} &= \xi(m) \alpha F(t - \tau) V(t - \tau) - \mu_c (C - C^*) \\ \frac{dm}{dt} &= \sigma V - \mu_m m\end{aligned}\tag{5.9}$$

с початковими умовами (5.10):

$$V(0) = V^0, \quad F(0) = F^0, \quad C(0) = C^0, \quad m(0) = m^0\tag{5.10}$$

і фазовими обмеженнями (5.11)

$$V(t) \geq 0, \quad F(t) \geq 0, \quad C(t) \geq 0, \quad m(t) \geq 0\tag{5.11}$$

де $\beta > 0$ - швидкість (темп) розмноження антигенів; $\gamma > 0$ - коефіцієнт, що враховує ймовірність зустрічі вірусів з антитілами і силу їх взаємодії, $\alpha > 0$ - коефіцієнт стимуляції імунної системи; $\rho > 0$ - швидкість виробництва антитіл однією плазмноклітиною; $\mu_c, \mu_f > 0$ - величини, зворотні тривалості життя плазмноклітин і антитіл відповідно; $\eta > 0$ - кількість антитіл, необхідна для нейтралізації одного вірусу; $\sigma > 0$ - швидкість (темп) ураження органу; $\mu_m > 0$ - швидкість відновлення маси ураженого органу; $C^* > 0$ - попередній рівень імунокомпетентних клітин (плазмноклітин); $\tau > 0$ - час, необхідний для формування каскаду плазмноклітин; $\xi(m)$ - незростаюча ненегативна функція, що враховує порушення нормальної роботи імунної системи внаслідок значного ураження органу (5.12):

$$\xi(m) = \begin{cases} 1, & 0 \leq m < 0,1 \\ (1-m) \frac{10}{9}, & 0,1 \leq m \leq 1 \end{cases}.\tag{5.12}$$

Модель (5.9) - (5.12) описує загальні закономірності, притаманні усім інфекційним захворюванням. Фактично ця модель визначає вид залежності тяжкості і результату інфекції від характеристик імунітету і властивостей антигену [5.24].

Результати, що описують закономірності стратегій імунної відповіді на виникнення захворювання, дозволяють здійснювати керування системою імунної відповіді. Як керування, що регулює інтенсивність процесів імунної відповіді і сприяє прискореному відновленню уражених органів і тканин, виступають використовувані при лікуванні засоби - зовнішнє керування, а також різні гормони і медіатори, які виробляються самим організмом - внутрішнє управління [5.24].

На підставі базової моделі інфекційного захворювання (5.13) можна досліджувати роботу керованої моделі виходячи з таких припущень. Для управління в моделі можуть використовуватися лікувальні медичні препарати шляхом введення додаткових членів в праві частини рівнянь моделі (5.13).

Для керування функціонуванням імунної системи при хронічних формах захворювань застосовується біостимуляція $u_1(t)$, заснована на введенні непатогенних антигенів, які не розмножуються. В результаті введення керуючої функції $u_1(t)$ модель, яка визначає поведінку імунної системи, складається з рівнянь, отриманих в результаті модифікації системи (1), шляхом додавання трьох диференціальних рівнянь, що відображають характер процесу лікування (5.13) [5.24]:

$$\begin{aligned}\frac{dV_1}{dt} &= -\gamma_1 F_1 V_1 + u_1 \\ \frac{dF_1}{dt} &= \rho_1 C_1 - \eta_1 \gamma_1 F_1 V_1 - \mu_{f1} F_1 \\ \frac{dC_1}{dt} &= \frac{F_1 V_1}{FV + F_1 V_1} \alpha_1 F_1(t - \tau) V_1(t - \tau) - \mu_{c1} (C_1 - C_1^*)\end{aligned}\tag{5.13}$$

Ефективність лікування гострих форм захворювань і захворювань з можливим летальним результатом досягається за допомогою реалізації імунотерапії, заснованої на введенні готових імуноглобулінів або донорських антитіл, які дозволяють змінити динаміку хвороби на користь одужання. В результаті введення керуючої функції $u_2(t)$ модель, яка визначає поведінку імунної системи, складається

з рівнянь (5.13) з урахуванням модифікації динаміки функції $F(t)$, яка, відображаючи характер процесу лікування, може бути описана диференціальним рівнянням (5.14):

$$\frac{dF}{dt} = \rho C - \eta F V - \mu_f F + u_2 \quad (5.14)$$

Принципи обробки інформації молекулами білків і імунними мережами, які використовуються в новому напрямку інформатики – імунокомп'ютіngu (ІК), дозволяють вивчати і створювати алгоритми керування імунною відповіддю в здоровому і хворому організмі [5.25].

В ІК організму людини застосовуються алгоритми і процеси обробки інформації, які використовують спеціальні, як математичний базис, тип обчислень, так і апаратну реалізацію. Новий математичний базис сформований в результаті аналізу просторової структури молекул білка.

Для розуміння і оцінки рівня реалізації типу обчислень необхідно розглянути механізм імунної відповіді, який має дві найважливіші функції: функцію імунізації і функцію апоптозу.

Функція імунізації, в свою чергу, має дві складові: а) систему даних і алгоритмів, які "вшиті" в імунну систему і передаються у спадок і б) система даних і алгоритмів, які формуються і налаштовуються в процесі роботи імунної системи. Перша складова виражається неспецифічним вродженим імунітетом і обумовлює однотипні реакції на будь-які чужорідні вторгнення. Головним клітинним компонентом системи неспецифічного імунітету служать фагоцити (Т-лімфоцити), основна функція яких - захоплювати і перетравлювати проникаючі ззовні агенти.

Друга складова спрацьовує щоразу, коли відбувається вторгнення молекулярно-дисперсної речовини (наприклад: білок, полісахарид, вірус). В цьому випадку реакцію забезпечує специфічний імунітет. Він отримується в результаті контакту організму з антигеном, має пристосувальне значення і характеризується формуванням імунологічної пам'яті. Його клітинними носіями служать лімфоцити, а розчинними компонентами- імуноглобуліни (антитіла). Специфічні антитіла продукуються спеціальними клітинами - В-лімфоцитами.

Для розуміння значущості явища імунного гомеостазу необхідно враховувати роль механізму апоптозу - процесу загибелі і підтримки певної кількості клітин в організмі. Апоптоз є активною формою загибелі клітини в результаті реалізації її генетичної програми.

Завдання імунної системи полягає в тому, щоб клітина, яка втратила функції цілісності була зруйнована, а її уламки виведені з організму. Для виконання зазначених функцій використовуються В-лімфоцити і Т-лімфоцити. Формальна В-клітина (В-лімфоцит) може бути визначена як (5.15):

$$B \rightarrow cell = \langle P, I_p, I_s, I_m \rangle, \quad (5.15)$$

де: P - рецептор клітини, який є також ФП; I_p - індикатор стану рецептора; I_s - індикатор стану клітини; I_m - індикатор мутації [5.24].

Формальна Т-клітина (Т-лімфоцит - макрофаг) може бути визначена як (5.16):

$$T \rightarrow cell = \langle K, P_0, P_1, \dots, P_k \rangle, \quad (5.16)$$

де K - тип Т-клітини; P_1, \dots, P_k - рецептори Т-клітини; P_0 - пов'язаний рецептор Т-клітини.

Розглянемо роботу формальної імунної мережі (ФІС) як об'єднання В-клітин, Т-клітин і вільних пептидів (ВП) за допомогою виразу (5.17):

$$ФІС = \langle B-cells \cup T-cells \cup CФП(s) \rangle. \quad (5.17).$$

Принципова різниця між ІК та іншими типами обчислень походить від функцій їх базових елементів і відповідно до їх біологічних прототипів і математичних моделей. Якщо штучний нейрон вважається пороговим суматором, сполученим з іншими строго фіксованими нейронами, то базові принципи ІК зовсім інші. Основний принцип - це вільне зв'язування базових елементів ІК (формальних протейнів) в рамках формальної імунної мережі (ФІМ).

В якості нового типу обчислень ІК пропонує наступні нові підходи до завдань ІІІ: розпізнавання образів і аналіз даних на основі принципів молекулярного впізна-

вання, уявлення мов і виведення рішень задач на основі аналогій між словами і біомолекулами.

Для реальних завдань вихідні дані в найзагальнішому випадку є багатовимірними і допускають представлення у вигляді масивів (векторів) дійсних або цілих чисел. Однією з основних особливостей ІК-алгоритму розпізнавання образів є проекція довільних даних в простір ФІМ [5.25]. Таке перетворення має наступні переваги: має строге математичне обґрунтування в термінах сингулярного розкладання (СР) матриць і дозволяє наочно уявити і візуалізувати будь-яку ситуацію як точку одно- або тривимірного простору.

Для розгляду особливостей розпізнавання образів в ІК необхідно визначити образ як n -мірний вектор-стовпець $X = [x_1, \dots, x_n]^T$, де x_1, \dots, x_n - дійсні числа і T - символ матричного транспонування. Далі визначимо розпізнавання образів як відображення $f(X) \rightarrow \{1, \dots, c\}$ будь-якого образу X в одне з цілих чисел $1, \dots, c$, які представляють класи.

Завдання розпізнавання образів може бути сформульовано таким способом, коли дані: число класів c ; набір із m навчаючих образів: X_1, \dots, X_m ; клас будь-якого навчаючого образу: $f(X_1) = c_1, \dots, f(X_m) = c_m$; довільний n -мірний вектор Z .

У зазначеній задачі необхідно знайти клас вектора $Z: f(Z)$. Для вирішення завдання необхідно сформувати навчаючу матрицю $A = [X_1, \dots, X_m]^T$ розмірності $m \times n$ і обчислити максимальне сингулярне число s , а також лівий і правий сингулярні вектори L і R навчаючої матриці за наступною ітеративною схемою (5.18):

$$L_{(0)} = [1 \dots 1]^T,$$

$$R^T = L_{(k-1)}^T A, \quad R_{(k)} = R/|R|, \quad \text{где } |R| = \sqrt{r_1^2 + \dots + r_n^2}, \quad (5.18)$$

$$L = AR_{(k)}, \quad L_{(k)} = L/|L|,$$

де $|L| = \sqrt{l_1^2 + \dots + l_m^2}$, $s_{(k)} = L_{(k)}^T A R_{(k)}$, $k = 1, 2, \dots$,

до виконання умови:

$$|s_{(k)} - s_{(k-1)}| < \varepsilon, \quad s = s_{(k)}, \quad L = L_{(k)}, \quad R = R_{(k)}.$$

Після отримання сингулярного числа s і правого сингулярного вектора R як "антитіла-проби", отримаємо для всякого $i = 1, \dots, m$ компоненту l_i лівого сингулярного вектора (як клітину ФІМ) і клас c_i , який відповідає навчаючому образу X_i .

На етапі розпізнавання в цьому завданні для всякого n -мірного образу Z обчислимо його енергію зв'язку з R згідно виразу (5.19):

$$w(z) = Z^T R / s \quad (5.19)$$

де s - це збережене сингулярне число, а R - це збережений правий сингулярний вектор навчаючої матриці A), а потім вибрати l_i , яка має мінімальну відстань d (відповідно, максимальну спорідненість $1/d$) з w у вигляді (5.20):

$$d = \min_i |w - l_i|, \quad i = 1, \dots, m. \quad (5.20)$$

Рішенням задачі будемо вважати знаходження класу c_i як шуканого класу образу.

Алгоритми роботи ІК дозволяють використовувати останні в розробці імунокомп'ютерів, які по ряду показників перевищують можливості сучасних комп'ютерів.

Рівні антитіл є індикатором тяжкості патологічного процесу при хронічному захворюванні і проявляються при обробці інформації, а саме при аналізі імуноглобулінів. Оскільки при стаціонарному хронічному захворюванні рівні $Ig M$ та $Ig G$ зазвичай залишаються в нормі, то основним індикатором хронічного процесу у багатьох випадках виявляється $Ig A$, рівень якого знижується в міру збільшення тяжкості хронічного процесу. Цей багаторазово перевірений факт наводить на думку про існування деякої закономірності, яку спробуємо встановити на основі аналізу рівняння балансу імуноглобулінів IgA , концентрацію яких позначимо через F . Тоді запишемо (5.21):

$$\frac{dF}{dt} = \rho C - \eta F V - \mu_f F. \quad (5.21)$$

Зауважимо, що під час відсутності антигенів ($V=0$) приходимо до стаціонарного рівняння балансу (5.22):

$$0 = \rho C^* - \mu_f F^*, \quad (5.22)$$

де C^* і F^* - рівні плазматичних клітин і антитіл Ig A, що визначаються гомеостазом. З останнього співвідношення випливає зв'язок F^* з C^* виду (5.23):

$$F^* = \frac{\rho C^*}{\mu_f}. \quad (5.23)$$

Припустимо тепер, що $V \neq 0$, але процес стаціонарний, тобто маємо справу з випадком хронічного захворювання. Тоді $dF/dt=0$, і ми приходимо до співвідношення (5.24):

$$\rho \bar{C} - \eta \gamma \bar{F} \bar{V} - \mu_f \bar{F} = 0. \quad (5.24)$$

Тут рисою зверху відзначені елементи, відповідні хронічному стану.

Введемо, далі, в розгляд гіпотезу про те, що при хронічному стані рівень плазматичних клітин визначається гомеостазом, тобто

$$\bar{C} = C^*$$

Це означає, що імунна система перестає стимулюватися FV-комплексами і організм перестає реагувати на V-антигени (якщо їх рівень тривалий час залишається одним і тим же). Тоді співвідношення (5.24) набуде вигляду (5.25):

$$\rho C^* - \eta \gamma \bar{F} \bar{V} - \mu_f \bar{F} = 0, \quad (5.25)$$

звідки отримаємо вираз (5.26):

$$\bar{F} = \frac{\rho}{\mu_f + \eta \gamma \bar{V}} C^* = \frac{F^*}{1 + \frac{\eta \gamma \bar{V}}{\mu_f}}. \quad (5.26)$$

Оскільки $\eta \gamma \bar{V} / \mu_f > 0$, то з (5.26) маємо:

$$\bar{F} < F^*$$

При хронічному захворюванні рівень «активних» антитіл (в даному випадку Ig A) повинен бути нижче норми, причому чим більше дефіцит в антитілах, тим важча форма хронічного процесу має місце. Це можна пояснити якісно наступним чином. Ми припустимо, що хронізація процесу призвела до виникнення толерантності по

відношенню до даних антигенів (бактерій або вірусів). Таким чином, організм перейшов на нормальне виробництво плазматичних клітин, що відповідає рівню гомеостазу С*. Плазматичні клітини виробляють певну кількість антитіл. Однак деяка частина цих антитіл витрачається на блокування збудників хронічної інфекції. В результаті рівень антитіл в організмі знижується в порівнянні з нормою.

Хронічні форми хвороби обумовлені недостатньо ефективною реакцією імунної системи. Виражена температурна реакція, зменшуючи максимальне значення концентрації антигену і стимулюючи антитілогенез, сприяє переходу хронічної форми хвороби в гостру з одужанням.

Таким чином, температурна реакція є важливим механізмом самозахисту і самолікування організму. З одного боку, в рамках моделі підвищення температури тіла зменшує максимальне значення антигену в ході захворювання і, отже, знижує ступінь ураження органу-мішені. З іншого боку, підвищення температури стимулює виробництво білкових і інших компонентів імунної системи, що сприяють якнайшвидшій нейтралізації і виведенню антигену з організму. Тому не викликане необхідністю застосування жарознижуючих лікарських препаратів призводить до зменшення резистентності організму, створюючи сприятливі умови для розвитку популяції вірусів або бактерій. Наслідком цього може бути хронізація хвороби.

5.7. Використання автоматного підходу у формуванні запам'ятовуючих структур при навчанні.

У розглянутому підході вчитель і учень інтерпретуються як адаптивні автомати [5.26, 5.27], а процес навчання складається з їх ітеративної взаємодії. З боку автомата «вчителя» вибирається оптимальна з його точки зору подача автомату-«учневі» навчальної інформації на основі того, як «засвоїв» на попередніх кроках навчання таку інформацію автомат-«учень».

У навчальній інформації важливою ланкою є база даних і знань з масивів синтаксичної інформації зі складною семантикою і нечіткими логічними зв'язками. Розробка простору ознак опису станів автоматів- «вчителя» і «учня» із зазначенням функціонально-метричних залежностей дозволяє задавати функціонування цих автоматів (рис.5.7). Процес навчання представляється у вигляді взаємодії двох ав-

томатних моделей - керованого A_0 (учень) і керуючого A (навчальна програма - вчитель). Виходом D автомата A , і відповідно, входом A_0 є навчальний матеріал - вправи, пояснення, довідкові матеріали і т.п. Виходом B автомата A_0 , і відповідно, входом A є події, що відбулися в процесі навчання [5.27].

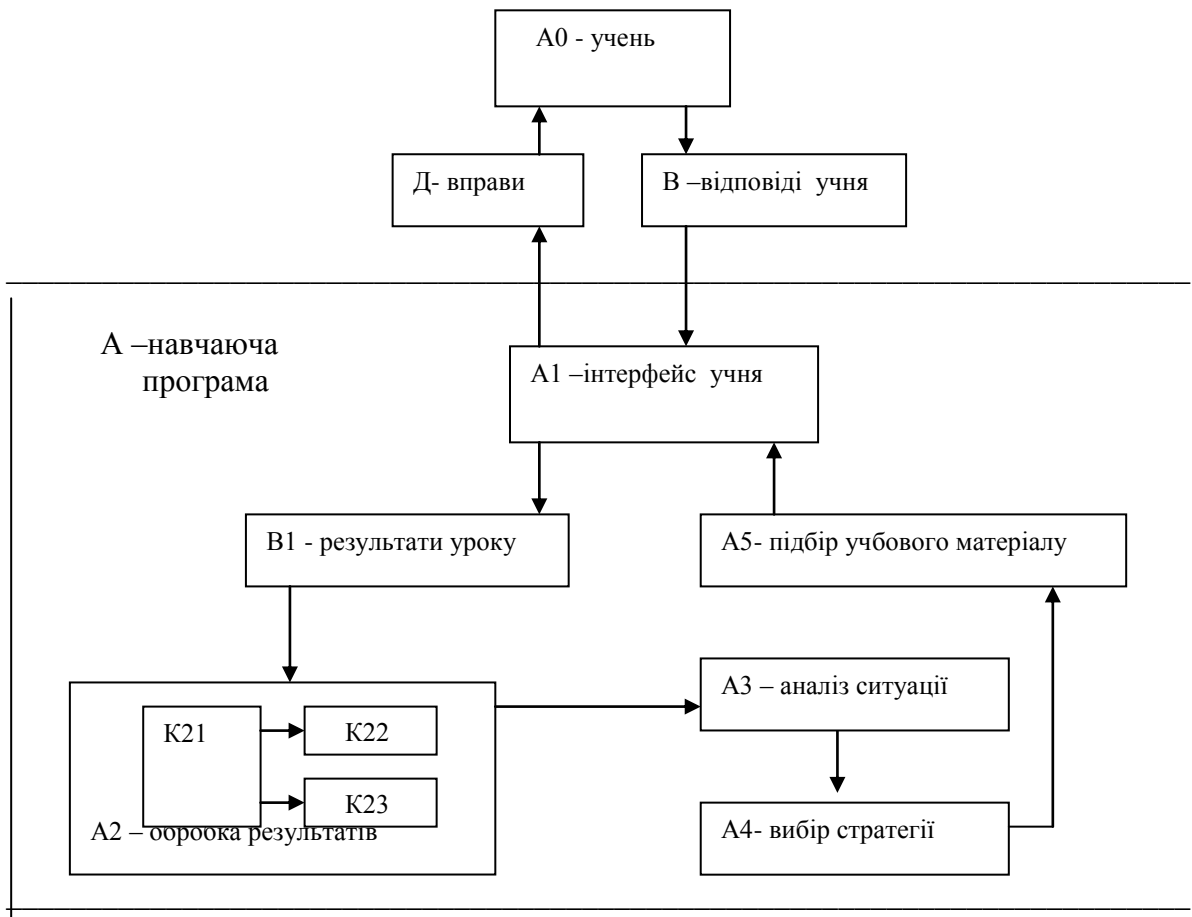


Рис.5.7. Схема роботи навчальної програми керуючого автомата A по керуванню автоматом A_0 .

Завдання навчальної програми (керуючого автомата A) - керувати за допомогою виходу D автоматом A_0 таким чином, щоб за мінімальний час привести його в заданий стан (досягти заданого навчального результату). Іншим варіантом постановки задачі може бути досягнення максимального результату за заданий час. Формально це може бути описано як мінімізація числа помилок у виході B автомата A_0 на певному відрізку часу T_{fin} , завершаючому процес навчання.

Це завдання керування може бути розбите на наступні підзадачі: пред'явлення учню навчального матеріалу, накопичення результатів уроку, складання протоколу

навчання, що зберігає в стислій формі історію всіх подій, що становлять вихід В автомата A_0 , а також складання на підставі протоколу навчання моделей учня (тип учня) і навчальної ситуації (рис.5.7).

Аналіз ситуації та визначення дій доцільно виконувати в даній навчальній ситуації для даного типу учня, а складання плану наступного уроку шляхом наповнення обраної стратегії навчальним матеріалом. Відповідно до цього автомат А може бути представлений у вигляді суперпозиції автоматів A_1 - A_5 , як це показано на рис.5.7.

Автомат A_1 являє собою перетворювач входів В у виходи D і B_1 відповідно. У найпростішому випадку це може бути автомат з одним станом. Безліч станів автомата A_2 є декартовий добуток множин q_{21} , q_{22} і q_{23} , що описують відповідно протокол навчання, модель учня і модель навчальної ситуації. Для опису необмеженої історії подій елементами кінечної множини q_{21} доцільно кодування динаміки події Е протягом усього навчання трійкою (5.27) [5.27]:

$$C_E = (F_E, N_E, R_E), \quad (5.27)$$

де: F_E - тип кривої - опис динаміки частоти події на інтервалі елементами кінцевого алфавіту, N_E - довжина кривої - відношення довжини протоколу до запланованого часу навчання T_0 . Очевидно, що довжина кривої, що відповідає дійсному числу з інтервалу (5.28):

$$N_E = [0, T_{\max}/T_0], \quad (5.28)$$

може бути з деякою точністю описана елементом кінцевої множини. R_E — вага кривої. Як і довжина кривої, вага может кодуватись елементами кінцевої множини. Таким чином, компонента k_{21} стану автомата A_2 є набір (5.29):

$$k_{21} = (C_{E1}, \dots, C_{Ek}) \quad (5.29)$$

для всіх подій E_i , що протоколюються. Більш детальний протокол навчання може бути отримано, якщо зберігати трійки C_{E1} (I_j) для кількох найбільш важливих інтервалів I_j : учбова мета, урок, а також часових інтервалів — сьогоднішнє заняття,

остання година тощо.

На основі входу $B_1(t)$ та поточного стану $k_{21}(t)$ автомат A_2 вираховує свій новий стан $k_{21}(t+1)$, якщо необхідно, уточняє тип учня k_{22} та учбової ситуації k_{23} [5.27] згідно (5.30):

$$A_2 = k_{21}(t+1), k_{22}, k_{23}. \quad (5.30)$$

Автомат A_3 займає центральне місце в схемі автомата A . Його задача — прийняття рішень про дії, які цілеспрямовано прийняти в данній навчальній ситуації — додаткові вправи, повторення, повернення до початку теми тощо.

Залежно від свого стану k_{21} автомат A_2 відносить A_0 до деякого підкласу M_i класу M . Цей підклас M_i і представляє собою тип учня. Характеристиками підкласу M_i є довжина ланцюжка станів, функція переходу $\varphi(k, D, E)$, яка визначає ймовірність переходу в наступний стан при значенні D входу автомата A_0 , і функція виходу $\psi(k, D, E)$, яка визначає ймовірність події E в стані k при значенні входу D .

Знаючи значення M_i , автомат A_3 може спланувати послідовність дій, що переводять A_0 в стан, бажаний для даної навчальної ситуації. Якщо припустити, що функція ψ лінійно залежить від складності вправи $L(D)$ (5.31):

$$D, \varphi(k, D) = \sum a_i \psi(k, D, E_i), \quad (5.31)$$

то підклас M_i буде задаватися кількома параметрами - довжиною N ланцюжка станів і коефіцієнтами лінійних функцій φ і ψ . Таким чином, автору курсу досить визначити набір типів учнів і описати, який стан є бажаним на кожному етапі навчання. Після цього автомат A_2 може вирішувати задачу віднесення A_0 до певного підкласу M_i , і визначення його поточного стану, а автомат A_3 - спланувати послідовність дій, що переводять A_0 в потрібний стан.

Автомат A_4 являє собою базу даних навчальних стратегій, аналогічно автомат A_5 може бути описаний як база даних навчального матеріалу, завдання якої підібрати матеріал. Наведений вище формальний фрагмент моделі дозволяє описувати і будувати комп'ютерні навчаючі системи загального вигляду на основі автоматних моделей.

В даний час розвиток систем комп'ютерних систем навчання характеризується переходом на платформи, які добре зарекомендували себе в якості основи для розробки корпоративних інформаційних систем і порталів. У першу чергу до таких систем можна віднести MS Sharepoint, який забезпечує розробнику багаті функціональні можливості щодо створення інфраструктури у вигляді ієрархії сайтів, керування навчаючим контентом, а також по організації спільної роботи учнів [5.26].

Наведені результати досліджень моделей та методів реалізації функціональних можливостей молекулярної пам'яті мозку при навчанні. При цьому обґрунтовано необхідність створення нових систем навчання на основі використання властивостей молекулярної пам'яті.

Викладач для керування навчальним процесом використовує неформалізовану, але суб'єктивно усвідомлену модель учня - його знань і переваг за формами навчання і способами подачі навчального матеріалу. При навчанні в комп'ютерних середовищах необхідно запропонувати алгоритм побудови відповідної формалізованої моделі.

Більшість підходів передбачає використання результатів тестування знань студентів, яке проводиться після вивчення кожної теми або розділу навчального курсу. У даній роботі використовується побудова моделі учня у вигляді нечіткого недетермінованого автомата виду [5.28] (5.32):

$$A = \langle U, X, s_0, \delta, \sigma \rangle, \quad (5.32)$$

де $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$ – кінечна множина входів, $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ – кінечна множина станів, $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_p\}$ – кінечна множина виходів, $\delta: X \times U \times X \rightarrow [0, 1]$ – функція переходів, $\sigma: X \times Y \rightarrow L$ – функція виходів, s_0 – початковий стан.

В даному визначенні функція δ народжує множину нечітких матриць переходу [5.29] у вигляді (5.33):

$$T_U = \{\delta_{X_i, X_j}^{(U)}\}, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n, \quad (5.33)$$

а функція σ народжує нечітку матрицю виходу у вигляді (5.34):

$$\sigma = \{\sigma_{X_i, Y_j}\}, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq p \quad (5.34)$$

Серед множини станів автомата потрібно виділити множину заключних станів X_n . Для цілей автоматизації навчання найбільший інтерес представляє такий тип автомата, для якого кожний стан (5.35):

$$X_i, i \in I = \{1, K, n\} \quad (5.35)$$

залежить від попереднього стану X_{i-1} . Даний вид залежності обумовлений пріоритетом реалізації цілей навчання, послідовністю вивчення різних тем і розділів курсу і т.п. Такий автомат можна описати нечітким графом [5.29] (5.36):

$$G = \{\mu_G(X_{i-1}, X_i) \in M\}, \quad (5.36)$$

де M – множина приналежностей елементів $X_{i-1} \times X_i$.

При такому розгляді мета навчання декомпозується на i послідовних (по часу засвоєння матеріалу) підзадач. Будемо інтерпретувати X_i як множину результатів i -го тесту, $Y_j, j \in J = \{1, K, p\}$ як множину інтервалів часу на навчання, L – множина, пов'язана з реалізацією вибраного способу навчання (засвоєння матеріалу) $u \in U$ на інтервалі часу Y_j . Очевидно, що в даному типі автомата $m = n$ і може трактуватися як число послідовних етапів (кроків) досягнення мети.

Рішення щодо вибору необхідних навчальних впливів і стану учня, що змінюються в часі, будемо трактувати, як нечіткі події на інтервалі $Y_k, 1 \leq k \leq p$. У цьому випадку функція переходів може задаватись експертним шляхом і відображати вже наявний досвід навчання, виходячи з практичного досвіду викладачів в подачі навчального матеріалу. Для обліку даної обставини необхідно побудувати індивідуалізовану функцію переходів. З цією метою використовується вихідна інформація від учня, яка включає прогноз застосування того чи іншого способу освоєння матеріалу в залежності від можливих результатів тестування у вигляді функції $\mu: X_i \times U_1 \rightarrow [0,1]$, а також прогноз переходу керованого процесу навчання із вихідного стану s_0 на першому кроці рішення в залежності від обмежень на наявні ресурси. На основі цієї інформації програмується автоматна модель. Для цього на кожному кроці вирішується система композиційних рівнянь виду [5.29] (5.37):

$$\frac{\mu(X_i)}{U_i} = \frac{\mu(X_{i-1})}{U_{i-1}} \circ \frac{\delta(X_{i-1}, X_i)}{U_i},$$

$$\mu(U_i) = \mu(X_{i-1}) \circ \delta(X_{i-1}, X_i),$$
(5.37)

де « \circ » - знак операції «композиція»; $\mu(X_i)/U_i, \mu(X_{i-1})/U_{i-1}$ - нечіткі оцінки можливості процесу навчання знаходиться в станах X_i та X_{i-1} при застосуванні способів освоєння навчального матеріалу U_i та U_{i-1} відповідно; $\mu(U_i)$ - нечітка оцінка вибору учнем способу засвоєння матеріалу U_i . Отримані оцінки групуються попарно, виходячи з наступної умови (5.38):

$$\mu(U_i) \leq \mu(X_i)/U_i.$$
(5.38)

Формування пар за таким принципом узгоджується з реальним вибором рішення: результату тесту з максимальною оцінкою можливості повинен відповідати спосіб засвоєння навчального матеріалу також з максимальною оцінкою застосування його учнем.

Таким чином, вище було показано, що для створення навчальних технологій на основі комп'ютерних навчальних середовищ можуть бути використані автоматні моделі учня і вчителя, здатні взаємодіяти між собою через простір формалізованого навчального матеріалу і з використанням інтелектуальних асистентів-автоматів, які допомагають створювати вправи і рішення задач без процедур програмування. Запропонований підхід дозволяє використовувати інструменти автоматичної корекції індивідуальних стратегій учня і можливості перенесення моделі учня, сформованої викладачем при особистих контактах, в освітнє комп'ютерне середовище, подібне MS Sharepoint.

5.13. Утворення асоціативного нейрона при навчанні.

Розглянемо процес утворення асоціативного нейрона в умовах роботи синаптичних мереж. При цьому можливо три типи перебудов (рис.5.8).

Для цього будемо досліджувати асоціативний нейрон як клітинну структуру, здатну утворювати в процесі навчання нові міжнейронні містки для нейронних імпульсів. Робочий елемент, за допомогою якого здійснюється перебудова - синапс.

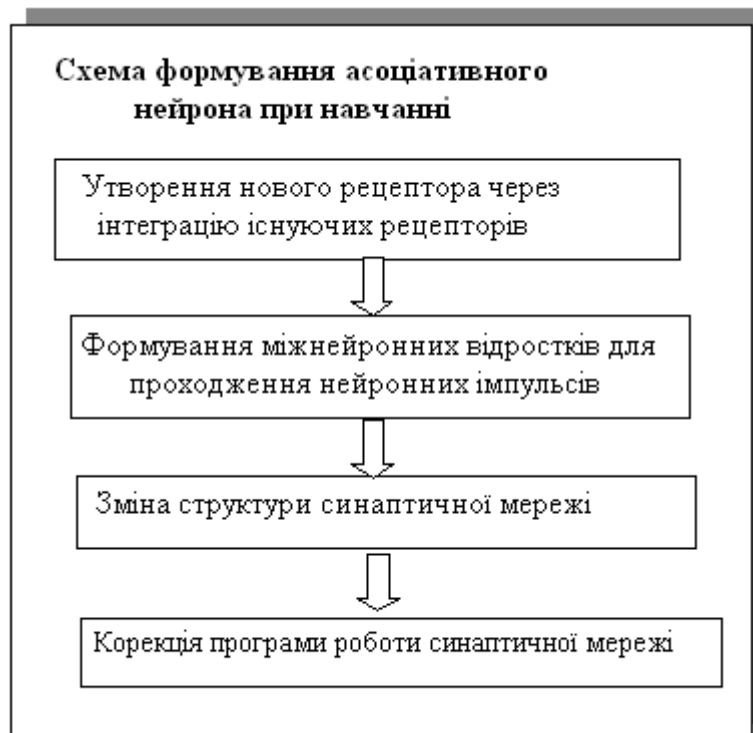


Рис.5.8. Схема формування асоціативного нейрона при навчанні.

Можливість утворення асоціативних зв'язків виявлена в багатьох відділах головного мозку - таламус, мозочок, ретикулярна формація і інші. Але, звичайно ж, найпотужнішою системою утворення нових міжнейронних містків є передній мозок і кора головного мозку.

Утворення асоціативних зв'язків обумовлено наявністю асоціативних нейронів, які мають контакти з нейронами, що входять до складу рецепторів і процесорів жорсткого типу. Для того, щоб створити асоціативну систему з максимально розширеними можливостями потрібні три умови. По-перше, необхідні нейрони, що підлягають об'єднанню, по-друге, необхідна достатня кількість об'єднуючих нейронів, і, по-третє, все це повинно бути розташоване компактно. Велика кількість нейронів, що підлягають об'єднанню, неможливо зібрати в компактні структури без порушення всієї сформованої схеми мозку. Вихід із цього утруднення еволюція знайшла за допомогою нейронних представників [5.30].

Розглянемо функції нейронних представників як копій нейронів якості і жорсткого типу, що мають з ними прямий зв'язок, але віддалених від основних утворень на необхідну відстань. Такий підхід дозволяє не змінювати вже створені мозкові

структури і призводить до появи нової кори головного мозку. Нейрони, які є представниками нижчих і філогенетично більш ранніх утворень і занурені в асоціативні нейрони - це і є кора головного мозку [5.30].

В ході подальшого вдосконалення дане утворення набувало все більшу і більшу самостійність, встановлюючи прямі зв'язки з рецепторами всіх модальностей і руховими структурами.

Таким чином, всі асоціативні системи, включаючи найпотужніші з них - в корі головного мозку, є «надбудовою» або «другим поверхом» до нейронних утворень жорсткого типу. Пошкодження цих структур не викликає порушень життєвих функцій мозку, але позбавляє можливості сприйняття складних сенсорних образів.

Першим, хто отримує інформацію з органів почуттів, є таламус. Таламус - це основне сенсорне передавальне ядро, яке отримує інформацію і переадресовує її відповідним відділам сенсорної кори. У ньому є неспецифічні зони, які пов'язані практично зі всією корою і забезпечують процеси її активації і підтримки неспання і уваги.

Серед підсистем, які регулюють емоційні стани, а також забезпечують навчання і пам'ять, важливе місце займають лімбічна система і ретикулярна формація. Лімбічна система представляє широку мережу пов'язаних між собою областей мозку, які регулюють емоційні стани при навчанні. До ядер, що створюють лімбічну систему, відносяться мигдалеподібні тіла і гіпокамп (що входять до складу скроневої частки), а також гіпоталамус і ядра т.зв. прозорої перегородки (розташовані в підкіркових відділах мозку). Для визначення ролі синаптичної мережі в роботі цілісної системи обробки інформації мозку необхідно розглянути підсистеми мозку, які взаємодіють з синаптичними мережами різних ієрархічних рівнів обробки інформації (рис. 5.9).

Ретикулярна формація - мережа нейронів, що простягнулася через весь стовбур до таламуса і далі пов'язана з великими областями кори. Вона бере участь в регуляції сну і неспання, підтримує активний стан кори і сприяє фокусуванню уваги на певних об'єктах. Іншим важливим фактором обробки інформації при запам'ятовуванні є дія нейромедіаторів, яка може видозмінюватися під впливом нейрохімічних

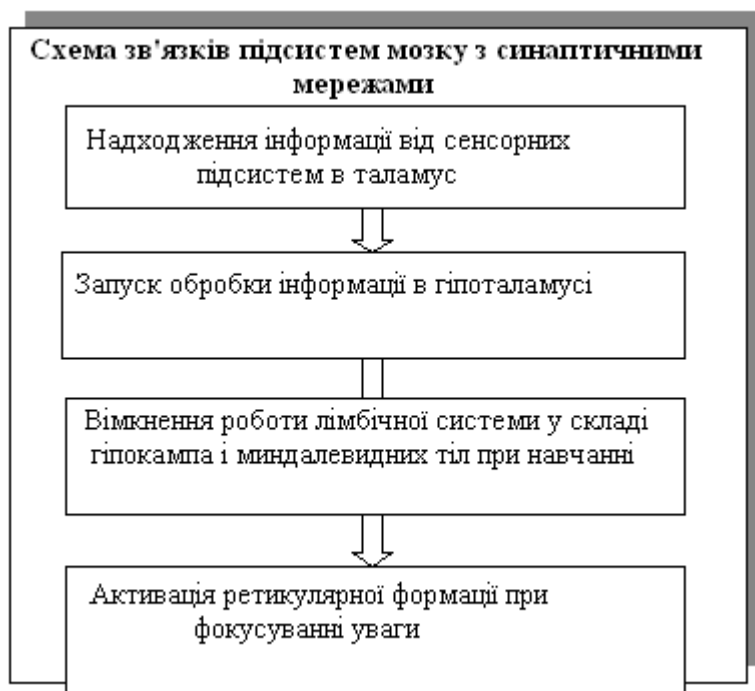


Рис.5.9. Схема зв'язків підсистем мозку з синаптичними мережами.

речовин - пептидних нейромодуляторів, що вивільняються пресинаптичною мембраною одночасно з медіатором.

З появою нових методів дослідження уявлення про функції мозку видозмінюються. Застосування апаратів, що дозволяють отримувати «карту» метаболічної активності різних відділів мозку, а також використання молекулярно-генетичних підходів дозволяють поглибити наші знання про процеси, що протікають в мозку.

Важливим моментом при функціональному аналізі роботи синаптичних систем є формування соціального і індивідуального досвіду в зв'язку з ієрархічними побудовами генів і когнітивним контролем при навчанні. Тут дуже важливим і суттєвим є фактор суб'єктивної новизни для запуску формування генів при навчанні.

Послідовність пірамідального розташування рівнів сприйняття на моделі суб'єктивного світу людини відповідає послідовності формування громадського та індивідуального досвіду індивіда.

Для визначення рівнів сприйняття моделі і відповідних їм підмножин систем, що представляють суспільний та індивідуальний досвід, використовують категорії суб'єктивної оцінки людиною середовища і власної поведінки, які характеризуються

факторами новизни. На системному рівні активність генів в мозку при навчанні переходить під когнітивний контроль (рис.5.10).

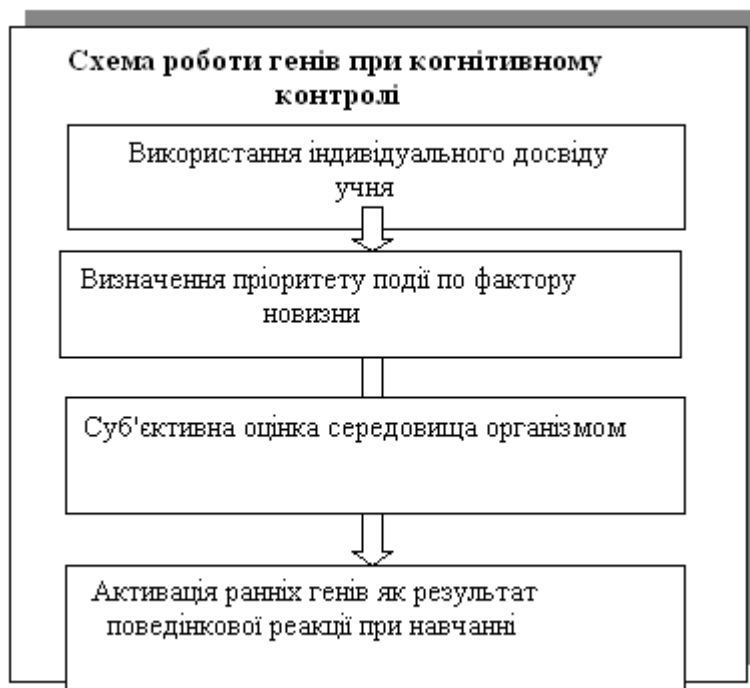


Рис.5.10. Схема роботи генів при когнітивному контролі.

Запуск процесів функціонування синапсу здійснюється синхронно з початком активації програм роботи синапсу, що включаються від спрацювання ранніх генів в ядрі нейрона. Вище вже згадувалося, що питання про те, викличе чи ні будь-яка поведінкова ситуація експресію "ранніх" генів в клітинах мозку, критичним чином залежить від змісту минулого індивідуального досвіду індивіда і визначається фактором суб'єктивної новизни даної події. Активація ранніх генів в поведінці є похідною від системних процесів звіряння аферентації [5.31] і змісту індивідуального досвіду, тобто є категорією суб'єктивної оцінки організмом середовища і власної поведінки.

Оскільки експресія "ранніх" генів в клітинах нейронів залежить від минулого досвіду індивіда і визначається фактором суб'єктивної новизни події, то такий фактор буде представлений елементарною одиницею систем навчання (ЕОСН) [5.32].

Відмінності між процесами розвитку і навчання чітко виявляються при системному аналізі проблеми. Якщо на рівні молекулярних механізмів транскрипції, нав-

чання дійсно виступає як процес розвитку, що продовжується, то на системному рівні, керування цим клітинним процесом зазнає фундаментальної трансформації. Воно переходить з під контролю тільки локальних клітинних і молекулярних взаємодій під контроль вищого порядку - загально мозкових інтеграційних процесів, які протікають в системах, що складають індивідуальний досвід організму (тобто системах нейронної пам'яті спільно з молекулярною пам'яттю на структурах ДНК-РНК).

Останню фразу слід розуміти досить умовно, оскільки система контролю в мозку людини всіх локальних клітинних і молекулярних взаємодій і загально мозкових інтеграційних процесів, які протікають в системах, що складають індивідуальний досвід організму, нікуди не переходить. Завдяки ієрархічній структурі контролю (ІСК) всіх процесів в мозку і системі зворотних зв'язків з точки зору системного керування метасистема контролю всіх процесів в ІСК мозку здійснюється одночасно.

В роботі синапсу важливим моментом є механізм спрацювання синапсу, тобто процесу передачі порції інформації далі за програмою контролю активності синаптичної мережі (КАС), що формується двома активними початками - координуючим центром контролю свідомості, що видає уявні установки і генним апаратом ядра нейрона (рис.5.11).



Рис.5.11. Схема роботи механізму зпрацювання синапсу.

Необхідно відзначити, що ці два начала працюють як парна єдина структура, завдяки наявності досить досконалої системи зворотних зв'язків. Тут необхідно підкреслити особливу важливість з'єднання координуючого центру контролю свідомості з мотиваційним центром і центром контролю новизни. Суть даного механізму в тому, що синапс, що працює несинхронно з іншими входами нейрона, виключається, в той час як синапси, які розряджаються одночасно, посилюються.

Далі синапси, розряджаються одночасно за програмою КАС, створюють потенціал дії і посилюються. Таким чином мозок отримує можливість встановлювати з'єднання згідно з поширенням імпульсів в синаптичних мережах, що розвиваються, налагоджуючи і удосконалюючи вихідну схему зв'язків.

З огляду на існування безлічі пересічних біохімічних шляхів, що передають сигнал через численні перехрестя від клітинної мембрани вглиб клітини важливо знати яким чином електричні сигнали, що йдуть з різною частотою по клітинній мембрані, знаходять свою дорогу через цитоплазму до кінцевої станції - ядра.

Інформація про електричний стан нейрональної мембрани подається в цю систему хімічних реакцій, що відбуваються в цитоплазмі, через керування входом іонів кальцію крізь потенціал-чутливі канали клітинної мембрани.

Можна сказати, що нейрони оточені морем іонів кальцію, однак всередині нейронів їх концентрація підтримується на надзвичайно низькому рівні - в 20 тис. разів нижче, ніж зовні [5.33]. Коли потенціал на клітинній мембрані досягає критичного рівня, клітина розряджається потенціалом дії, змушуючи кальцієві канали відкриватися на короткий час. Потоки іонів кальцію, що впадають до нейрона з кожним нервовим імпульсом, переводять електричний код в хімічний, який зрозумілий біохімічній машині, що працює всередині нейрона.

Деполяризація мембрани потенціалами дії відкриває кальцієві канали, розташовані в нейрональній мембрані, і запускає сигнальні шляхи, що ведуть в ядро і включають певні гени.

При перевірці активності гена *zif268*, пов'язаного з виникненням довготривалої пам'яті (ДП) було виявлено, що він також виявився активованим розрядом гіпокампальних нейронів при відключених синапсах. Однак, коли провести таку ж

стимуляцію в присутності іншої речовини, яка блокує потенціал-чутливі кальцієві канали - які і були справжнім джерелом сигналу від мембрани в ядро, - то можна виявити, що у відповідь на розряд нейронів в них уже немає ні фосфорилування CREB, ні активації zif268 і іншого білка, пов'язаного з пізньою ДП, так званим MAPK [5.34].

Таким чином кожен синапс не посилає своє власне повідомлення в ядро, а транскрибуючі механізми ядра просто прослуховують вихідний сигнал нейрона і на його основі вирішують, синтезувати чи ні білки пам'яті[5.26]. Такий принцип роботи пам'яті представляється дуже розумним.

Процес формування довготривалої молекулярної пам'яті відбувається за програмою: визначення важливості - синапси посилають багаторазово команду про це в нейрон - включаються відповідні гени - створюються білки пам'яті, які ставлять клеймо на вихідних синапсах (рис.5.12).

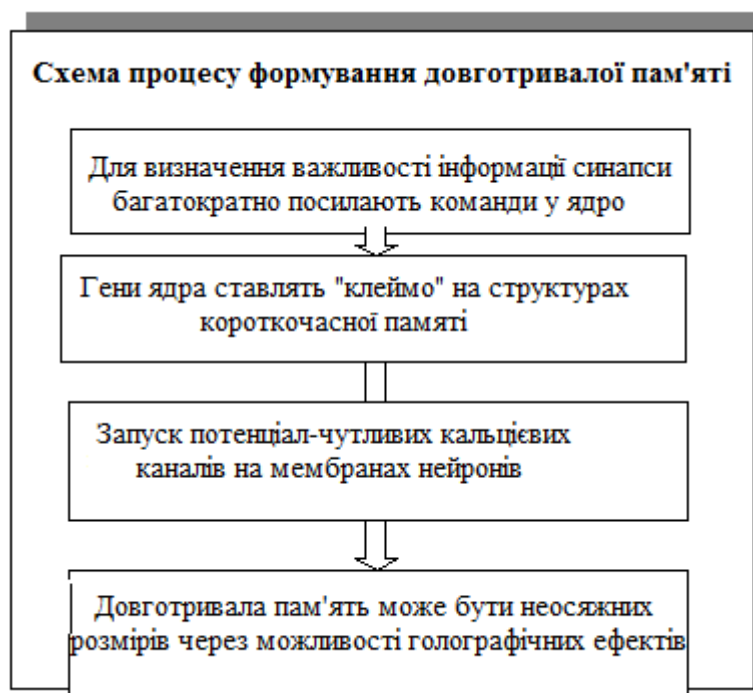


Рис.5.12. Схема процесу формування довготривалої пам'яті.

Отримані результати показують, що немає ніякої необхідності в посереднику між синапсом і ядром. Як і в дослідженнях розвитку мозку, деполяризація мембрани потенціалами дії здатна відкривати кальцієві канали, розташовані в нейрональній

мембрані, і здійснювати запуск сигнальних шляхів, що ведуть в ядро і включають певні гени.

Як спонукають правила навчання Хебба [5.26], розряд нейрона, що відбувається внаслідок порушення синаптичних входів клітини, є тим фактором, який необхідний для зміцнення пам'яті. Адже ми не завжди заздалегідь знаємо, які події слід зберегти в пам'яті надовго. Оперативна пам'ять, необхідна для дій в сьогоденні, забезпечується короточасними змінами сили окремих синапсів.

Механізм отримання енграми містить ряд етапів, протягом яких відбувається поява інформаційного відбитка за рахунок зміни електричних властивостей нейронів і проникності синаптичних мембран з наступним включенням ферментних систем і зміною інтранейронального метаболізму (рис.5.13).

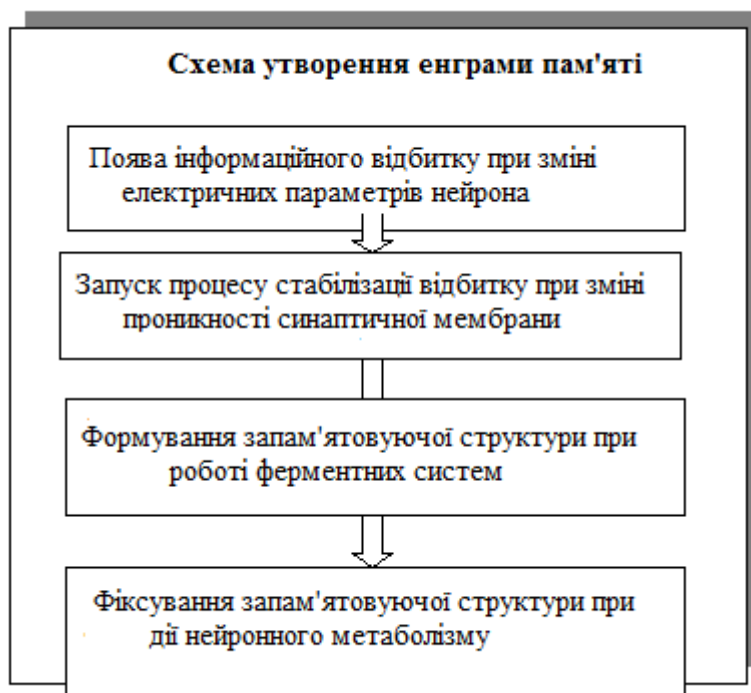


Рис.5.13. Схема отримання енграми пам'яті.

Якщо подія досить важлива або повторюється багато разів, то синапси змушують нейрон, в свою чергу, видавати нервові імпульси інтенсивно і багаторазово, заявляючи тим самим: "цю подію слід запам'ятати". Включаються відповідні гени, білки пам'яті відшуковують ті синапси, в яких утримується короточасна пам'ять, і,

можна сказати, позначають їх клеймом. При цьому важливу роль відіграють потенціал-чутливі кальцієві канали на мембрані нейрона.

Пам'ять сама по собі від навантаження (а обсяг інформації як і раніше подвоюється кожні десять років) не розвивається. Для цього потрібні пристосування. Зараз доведено, що довготривала пам'ять вічна, людина пам'ятає кожен день свого життя і при певних умовах може згадати будь-які подробиці - під гіпнозом, в результаті стресу або хвороби [5.35].

Необхідно відзначити, що такі можливості довготривалої пам'яті існують завдяки прояву роботи принципу голографічного пам'яті.

В даний час серед фахівців в галузі молекулярної інженерії прийнятий комплексний підхід до пояснення механізмів пам'яті: вона є ознакою мозку як системи в цілому, а не його окремих молекулярних і клітинних компонентів. Перехід пам'яті з короткочасної в довготривалу здійснюється через перетворення і упорядкування її слідів (енграм), в результаті чого фіксація пам'яті зміцнюється, а ймовірність забування зменшується.

Яким чином події, що відбуваються, відкладаються в пам'яті. При цьому, забування починається відразу ж з моменту сприйняття навколишнього середовища і, поступово затухаючи, триває протягом усього життя. Основний відсів інформації починається при переході з сенсорної в первинну пам'ять. У сенсорній пам'яті закарбовується все, що сприймається органами почуттів.

В [5.36] було показано, що здатність стирати інформацію має спеціальна білкова молекула шляхом створення умов, що перешкоджають формуванню пам'яті. Біологічним носієм забування виявився фермент, присутній у великій кількості у всіх клітинах організму – протеїнфосфатаза (PP1).

Носій забування фермент PP1 підтримує різні види забування. Щоб виявити молекулярний носій забування, була створена спеціальна порода мишей [5.37]. В їх геном був вбудований ген, що кодує синтез білка, який "вимикає" PP1. У таких генетично модифікованих мишей PP1 можна "вимикати" і "вимикати" у міру потреби, запускаючи або припиняючи вироблення білка-блокатора (рис.5.14).

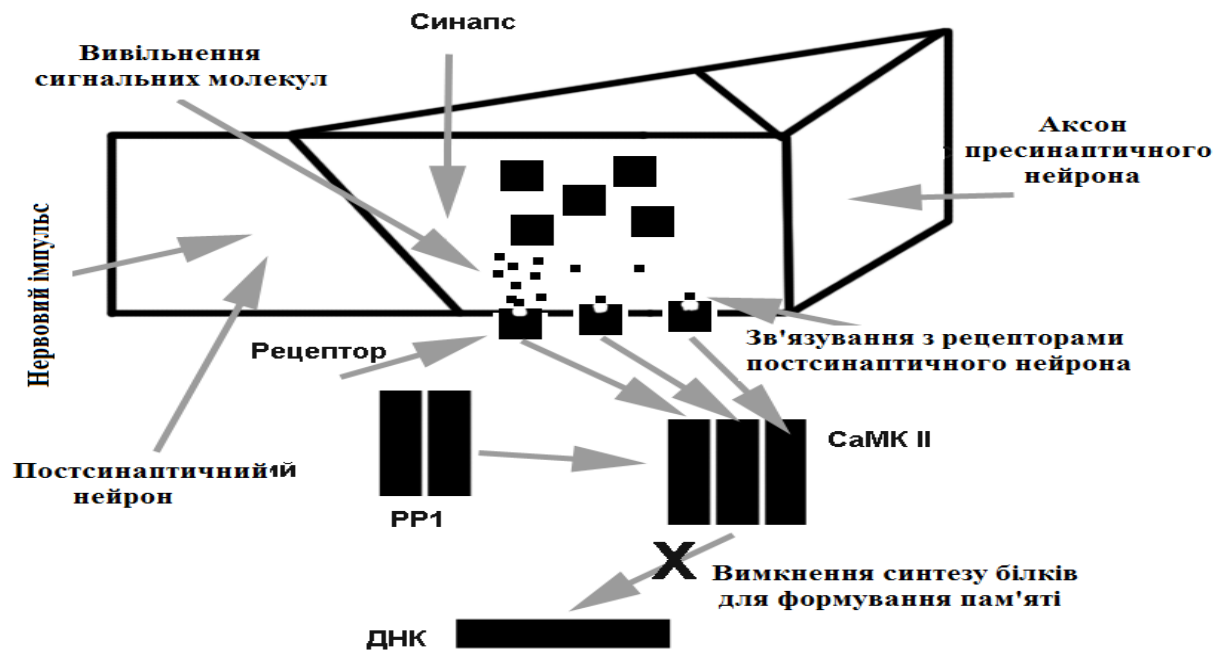


Рис.5.14. Молекулярний механізм забування.

Роль "вимикача" виконує антибіотик доксициклін. Його додавали тваринам в їжу, і клітини починали виробляти блокатор синтезу PP1. Для пояснення роботи ферменту PP1 розглянемо процес запам'ятовування в гіпокампі, куди надходить нова інформація. Спочатку нервовий імпульс викликає вивільнення сигнальних молекул ("молекул пам'яті") з нервових закінчень аксона пресинаптичного нейрона. Потім молекули нейромедіатора зв'язуються з рецепторами постсинаптичного нейрона. На завершальному етапі рецепторне зв'язування активує фермент СаМКІІ, який бере участь у формуванні пам'яті. Розглянемо випадок, коли PP1 блокує СаМКІІ. В результаті цей фермент втрачає здатність посилати сигнали про початок синтезу білків, необхідних для формування нервового імпульсу. Так PP1 "вимикає" механізм запам'ятовування. Таким чином, фермент PP1 "вимикає" ген для утворення білків, необхідних для формування і збереження пам'яті.

Крім того, що фермент PP1 перешкоджає запам'ятовуванню при інтенсивному навчанні, він також сприяє забуванню засвоєної інформації. Зазначене забування за допомогою PP1 сприяє ліквідації непотрібної інформації, що зберігається в мозку. У загальних рисах зрозумілий і механізм цього процесу: PP1 знижує активність білка, який дає сигнал конкретному гену почати свою роботу по синтезу нових білків. При

"виключенні" гена перестають утворюватися білки, необхідні для формування і збереження пам'яті. Але такий механізм, мабуть, не єдиний. Справа в тому, що існує забудькуватість двох типів: стирання інформації та її маскуванню. Погана інформація стирається в пам'яті остаточно, а більш істотна залишається тимчасово прихованою. У світлі цієї теорії PP1 блокує, з одного боку, синтез білків, відповідальних за передачу нервового імпульсу в ході навчання, що призводить до необоротного стирання інформації, з іншого - відновлення інформації, "сплячої" в глибинах пам'яті. Але механізм маскуванню інформації поки невідомий.

Відкриття "молекули забудькуватості" випередило свій час. Воно показує, як багато ще невідомого належить зрозуміти в механізмі формування свідомості. Зрозумілим є одне: забудькуватість - процес фізіологічний, строго визначений і контрольований на біохімічному рівні у вигляді програм ядра нейрона.

Таким чином, можна говорити, що забудькуватість життєво необхідна: вона охороняє потік нашої пам'яті від насичення і крім того, допомагає мозку впорядкувати інформацію по її значущості. Дійсно, якщо уявити собі, що ми запам'ятаємо все, хоча б один раз побачене або почуте, нормальний перебіг життєвих процесів припиниться.

В [5.36] було запропоновано шлях лікування хворих склерозом шляхом відновлення здатності до запам'ятовування, але не стимулюючи пам'ять, а блокуючи забування, тобто "вимикаючи" PP1. Тому "молекула забудькуватості" вже зацікавила деякі фармацевтичні фірми.

5.9. Дослідження роботи системоутворюючого фактора як результату моделювання майбутніх подій на нейронах.

Для здійснення розуміння поверхневої структури, самого сенсу сказаного і прихованої структури вираження в мозку існує психологічний апарат, який здійснює розуміння і носить умовну назву - апарат для аналізу пропозицій (ААП) [5.33].

ААП починає з допущення, що пропозиція буде мати наступний порядок: суб'єкт, дієслово, об'єкт; якщо пропозиція має не такий порядок, розуміння часто сповільнюється. Але ААП також покладається на кілька інших підказок, і вони зазвичай утримують ААП на правильному шляху. Функціональні слова, наприклад,

використовуються як ключі до структури пропозиції. Семантика також дає важливу інформацію про те, хто, що, з ким зробив [5.38].

Розглянемо можливий механізм розуміння сенсу сказаного через структуру поняття. Так, поняття фіксує суттєве і ігнорує несуттєве в предметах і явищах, воно може розвиватися за рахунок збагачення свого обсягу і змісту. Тому нове знання може входити в стару систему понять і виражатися за допомогою відомих слів.

Поняття виступає як важливий елемент рівнів сприйняття. У цій якості воно надає процесам мислення й мови додаткову вибірковість і вертикальну глибину.

Так з'являються нові об'єкти і поняття, причому слова-поняття дозволяють нам узагальнювати і поглиблювати наші знання про об'єкти, виходячи в їх пізнанні за межі безпосереднього досвіду, за рамки того, що нам дано через органи чуття. Поняття фіксує суттєве і ігнорує несуттєве в предметах і явищах, воно може розвиватися за рахунок збагачення свого обсягу і змісту.

Одним з важливих результатів створення спільнот нейронів є моделювання майбутніх подій за оцінкою діяльності суб'єкта навчання (рис.5.15).

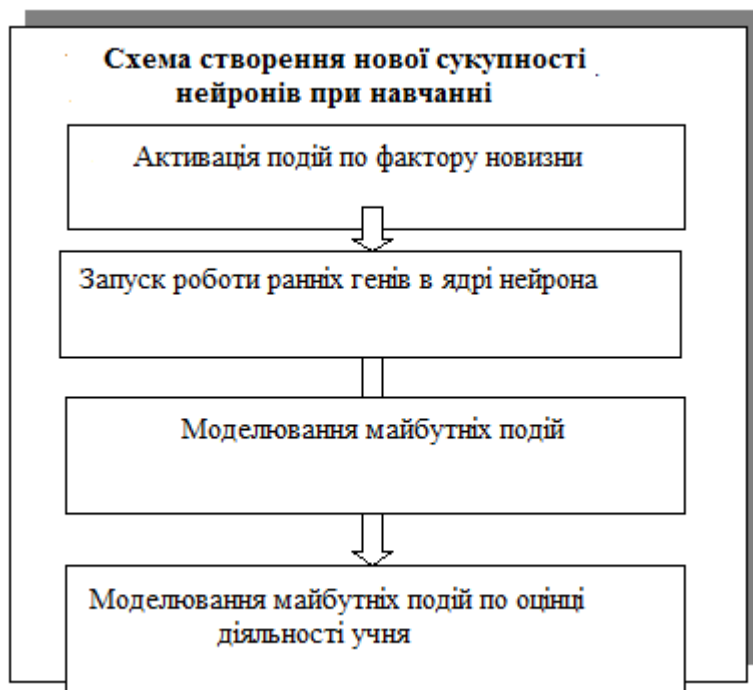


Рис. 5.15. Схема створення нової сукупності нейронів при навчанні.

Підмножини систем, в яких представлені і відокремлені категорії суб'єктивної оцінки індивідом середовища і власної поведінки, якісно покращують об'єктивну

оцінку навколишнього середовища і результатів власної діяльності. Така оцінка дозволяє активізувати фактор новизни і призводить до посиленої активації ранніх генів в клітинах мозку людини.

Подання основ навчання лежить у висуванні і перевірці гіпотез у вигляді моделей майбутніх подій. Розглянемо процес навчання через метод побудови моделей майбутніх подій. Тут важливим фактором є положення, коли учень представляє досліджуване шляхом висування, селекції гіпотез і побудови моделей майбутніх подій. Такий процес дозволяє оптимально проводити процес навчання.

Побудова моделей майбутніх подій і опис відношення організму із середовищем в новій ситуації як процесу, який включає висування та селекцію гіпотез, були розглянуті в [5.39]. Ідея про те, що в основі навчання лежить висування і перевірка гіпотез, в даний час використовується при розробці нових моделей в когнітивній психології [5.40].

В області практичної діяльності людини реальність стадії формування досвіду усвідомлена вже давно. Аналіз процесу засвоєння нового музикального твору або навчання новому акробатичному елементу дозволив зрозуміти, що «кожний елемент повинен бути готовий психічно перед тим, як він буде випробуваний на роялі і що «чим краще учень представить навчальний рух, тим швидше буде проходити процес навчання».

Можна зробити висновок, що висування акту-гіпотези та його тестування у «внутрішньому» плані, дозволяє здійснювати перевірку гіпотези на відповідність структурі досвіду індивіда шляхом пробної організації сумісної активності нової сукупності нейронів із врахуванням ступеню новизни гіпотези.

Також можна вважати, що фіксація нової інтеграції не обов'язково вимагає досягнення результату «зовнішньої» поведінки. Але це не означає, що порушується одне з основних положень теорії функціональних систем – про результат як системостворюючий фактор. Системостворюючим фактором в такому випадку виступає результат тестування гіпотези у внутрішньому плані.

Пробна організація сумісної активності нової сукупності нейронів залежить від багатьох обставин: ступінь новизни гіпотези, складність досвіду, який є у індиві-

да та ін. При цьому можлива реалізація компромісу між швидкістю моделювання майбутніх подій та відносно довгим пошуком ефективного рішення.

Усвідомленню, «інтелектуальному» рішення безпосередньо передують стадія «емоційного рішення», коли у людини виникає відчуття, що нею знайдено принцип рішення задачі, але вона ще не може його зформулювати.

Логіку роботи мозку можна представити як безперервне у часі передрікання подій навколишнього середовища з одночасним тотальним контролем акцептором правильності зроблених передрікань [5.41,5.42]. Формальна модель нейрона визначає функцію нейтрона як здійснення семантичного ймовірнісного виведення правил, які передрікають по його вхідним збудженням вихідне збудження аксона [5.41].

На всіх етапах своєї роботи від нейронного рівня до рівня прийняття рішень мозок вирішує одну задачу - організацію безперервного процесу передбачення і контролю його правильності. Тому вельми актуальним є завдання встановлення взаємозв'язку між логічною передбачуваною моделлю нейтрона і фізичною моделлю, що реалізує зазначені властивості нейрона на структурах мікротрубочок цитоскелета нейрона.

Розглянемо можливості цитоскелета нейрона з керування інформаційними процесами при запам'ятовуванні. Базовими елементами структури цитоскелету є мікротрубочки, які представляють собою порожні циліндричні трубки з зовнішнім діаметром 25 і внутрішнім - близько 14 нм, довжиною 1 - 10 мкм, організовані в більші трубкоподібні волокна. На кожен мікротрубочку доводиться по 13 рядів димерів тубуліну. Розміри димера - 8 x 4 x 4 нм, а його молекулярна вага близько 110 кілодальтон [5.43]. Димер тубуліну може існувати в двох різних геометричних конфігураціях, названих конформаціями. Конформації ці, обумовлені тим, що в центрі димера в його "безводній частині" є електрон, який може займати одне з двох можливих положень. На здатність молекул димеру перемикатися з однієї конформації в іншу впливають сили Ван-дер-Ваальса. Для того щоб сталося "перемикання" з однієї конформації в іншу, досить, щоб один електрон "перескочив з місця на місце".

Розглянемо реалізацію динамічної системи з асоціативною пам'яттю у ви-

гляді дипольної псевдоспінової системи мікротрубочок цитоскелету нейрона. Тенденцію до зниження енергії E при еволюції системи псевдоспінів мікротрубочки можна описати рівнянням релаксаційної динаміки [5.41] (5.39):

$$S_i^z = h_i, \quad h_i = -\delta H / \delta S_i^z = \sum_{j \neq i}^N J_{ij} S_j^z \quad (5.39)$$

де h_i - локальне самоузгоджене поле, яке діє на псевдоспін S_j^z з боку інших псевдоспінів та визначається диференціюванням за часом. Система псевдоспінів є системою з безперервним часом. Це зручно для аналогової реалізації, але для моделювання процесу еволюції на цифрових комп'ютерах потрібно побудувати схему, що функціонує в дискретному часі крок за кроком. В рамках моделі еволюції системи псевдоспінів з дискретним часом псевдоспінова система мікротрубочки цитоскелета повинна здійснювати перетворення вхідної конфігурації S_j^z так, щоб вихідна конфігурація $S_j^{z'}$ була ближче до тієї картини-еталону, яка є правильною відповіддю. Перетворення системи псевдоспінів будемо шукати в наступному вигляді [5.41] (5.40):

$$S_i^{z'}(t+1) = \text{sgn} \left[\sum_{j=1, j \neq i}^N J_{ij} S_j^z(t) \right] \quad (5.40)$$

Дипольна система мікротрубочки має пам'ять, що зберігає певний заданий набір образів-еталонів, яка намагається згадати один з них, якщо їй пред'являється будь-який з цих образів, спотворений перешкодами. В результаті завершення процесу навчання в системі псевдоспінів вхідний образ асоціюється з одним з запам'ятованим раніше образів-еталонів, і можна говорити, що дипольна система мікротрубочки виступає в ролі розподіленої структури з асоціативною пам'яттю.

Набір картин-образів, які зберігаються в дипольній системі мікротрубочки цитоскелета є випадковим. Необхідно так вибирати коефіцієнти зв'язку J_{ij} для системи псевдоспінів, щоб стійкими виявилися картини, які хотілося б зберегти в пам'яті як образи-еталони [5.44]. Нехай необхідно записати образ, який характеризується своєю певною орієнтацією $S_i^z = \xi_i$ для кожного псевдоспіна i . Виберем коефіцієнти зв'язку J_{ij} так, щоб $J_{ij} = \xi_i \xi_j$. Записана псевдоспінова

конфігурація автоматично відповідає мінімуму енергії E , тобто є стійкою притягуючою просторовою картиною. При цьому для будь-якої обраної пари псевдоспінів енергія взаємодії $\delta E_{ij} = -J_{ij} \xi_i \xi_j = -\xi_i^2 \xi_j^2 = -1$, тобто досягає найменшого можливого значення.

Отримана таким шляхом система, зберігає у своїй пам'яті лише одну картину, якій з плином часу відповідає початкова псевдоспінова конфігурація. Цей недолік можна усунути. Припустимо, що нам хотілося б записати M різних образів-еталонів, кожен з яких характеризується своєю конфігурацією псевдоспінів: $\{\xi_i^{(m)}\}$, де $m = 1, 2 \dots M$, причому різні конфігурації ортогональні, тобто отримаємо вираз (5.41):

$$N^{-1} \sum_{j=1}^N \xi_j^{(m)} \xi_j^{m'} = \delta_{mm'} \quad (5.41)$$

Виберемо коефіцієнти зв'язку J_{ij} у вигляді (правило Хебба [5.44]) (5.42):

$$J_{ij} = \sum_{m=1}^M \xi_i^{(m)} \xi_j^{(m)} \quad (5.42)$$

Тоді для не надто великого числа записаних картин-еталонів можна гарантувати, що всі вони виявляться стійкими конфігураціями дипольної системи мікротрубочок, тобто відповідатимуть мінімуму енергії E .

Щоб довести це, зауважимо, що енергію системи E можна уявити як (5.43):

$$E = -(1/2) \sum_{i=1}^N h_i S_i^z, \quad h = \sum_j J_{ij} S_j^z \quad (5.43)$$

Ясно, що в стані з мінімумом енергії E всі спіни повинні бути направлені по полю, тобто знак S_j^z повинен збігатися зі знаком h_i . Нехай коефіцієнти зв'язку J_{ij} задаються формулою (5.42), а конфігурація псевдоспінів мікротрубочки відповідає одній із записаних картин-еталонів. Перевіримо виконання зазначеної вище умови і отримаємо (5.44) [5.41]:

$$h_i S_i^z = \sum_j \sum_{m=1}^M \xi_i^{(m)} \xi_j^{(m)} \xi_i^{(m')} \xi_j^{(m')} = N \xi_i^{(m)} \xi_j^{(m)} = N > 0 \quad (5.44)$$

Отже, кожен з M записаних образів дійсно відповідає деякій притягуючій псевдоспіновій конфігурації, тобто стану з мінімумом енергії E . Крім записаних в пам'ять образів, які характеризуються набором конфігурацій псевдоспінів $\{\xi_i^{(m)}\}$, система завжди має деяке число помилкових образів, також відповідаючим станам з мінімумом енергії. Зокрема, поряд з кожним записаним образом завжди зберігається і його дзеркальне відображення, тобто образ з набором орієнтацій спінів $\{-\xi_i^{(m)}\}$. Легко перевірити, що він відповідає тому ж значенню енергії E .

Для ортогональних образів матриця J_{ij} , побудована за правилом (5.41), є проективною. Діючи на довільний вектор з N компонентами, ця матриця проектує його на M -мірний простір, який містить вектори $\{\xi_i^{(m)}\}$. У межах такого підпростору дію матриці на будь-який вектор можна звести до множення на N . Це означає, що для будь-якого вектора з компонентами $\xi_i = \sum_m C_m \xi_i^{(m)}$, який представляє собою лінійну комбінацію M записаних образів-еталонів, справедливо $h_i \xi_i = (f_\xi)_i \xi_i = N \xi_i^2 > 0$. При цьому не всяка лінійна комбінація є допустимою. Для того щоб відповідати якомусь образу, всі компоненти ξ_i , в цій лінійній комбінації повинні приймати лише значення ± 1 . Якщо записані в пам'ять образи такі, що вони дозволяють побудувати лінійну комбінацію, що є деяким новим образом, цей додатковий помилковий образ також відповідає мінімуму повної енергії і є притягуючою псевдоспіновою конфігурацією.

Таким чином, щоб записати образ, який характеризується псевдоспіновою конфігурацією ξ_i , необхідно за допомогою зовнішнього впливу сформувати картину псевдоспінових зв'язків, що характеризується коефіцієнтами $J_{ij} = \xi_i \xi_j$. Якщо ми хочемо записати M різних образів, система псевдоспінових зв'язків повинна характеризуватись коефіцієнтами, які отримуються шляхом сумування відповідних координат псевдоспінових конфігурацій для всіх цих образів.

Система має асоціативну пам'ять, якщо при подачі на її вхід деякої картини вона автоматично відбирає і подає на вихід найбільш близьку до неї картину, яка зберігається в пам'яті. Іншими словами, по досить великому фрагменту або спотвореному зображенню така система може відновити повне зображення. Очевидно, що асоціативна пам'ять є окремим випадком розпізнавання образів [5.45, 5.46].

Отже, подаючи на вхід в якості початкової умови для такої розподіленої системи деяку структуру, ми будемо здійснювати її автоматичне аналогове розпізнавання, яке буде паралельним, оскільки воно виконується в ході одноразового навчання даної динамічної системи.

Змінюючи послідовність вивчення різних об'єктів, тривалість занять і т.д., можна знайти оптимальний шлях навчання в конкретному випадку. Один з напрямків використання імітаційного моделювання процесу навчання пов'язаний зі створенням навчальної програми, що моделює навчальний процес в школі і призначений для тренування студентів. Він повинен допускати зміну параметрів учнів, тривалість занять, розподілу навчального матеріалу і стратегії поведінки вчителя. У процесі її роботи студент, який грає роль учителя, змінює швидкість подачі навчальної інформації, швидко реагує на питання учнів, проводить контрольні роботи, ставить оцінки, намагаючись домогтися найбільшого рівня знань за заданий час. Після закінчення «навчання» на екран виводяться графіки, що показують зміну «кількості знань учнів класу», оцінки за «виконані контрольні роботи» і т.д. Крім того, навчальна програма аналізує роботу «вчителя» або студента і ставить йому оцінку.

Для відповіді на питання про існування аналогової асоціативної пам'яті в мікротрубочках цитоскелета необхідно виділити в ній розподілену динамічну систему, аттракторами якої в її конфігураційному просторі були б типові картини-образи у вигляді еталонів. Кожна така картина буде мати свою область притягання, і всяка початкова умова, що представляє собою допустиму картину, зобов'язана потрапити в одну з її областей притягання. В ході навчання ця початкова структура трансформується в найближчу із структур-атракторів, які зберігаються в пам'яті, до області притягання якої вона належала.

В [5.47] відзначається, що механізми сприйняття і мислення засновані на єдиному принципі - інформаційному синтезі, який забезпечується поверненням збудження до місця його виникнення. При цьому сутність повернення полягає у зіп'явставленні поточної інформації з тією, що була раніше, тобто теперішнє як би дивиться

на себе через призму минулого. Для ілюстрації такого процесу на рис. 5.16 приведена схема кільцевого руху зорової інформації.

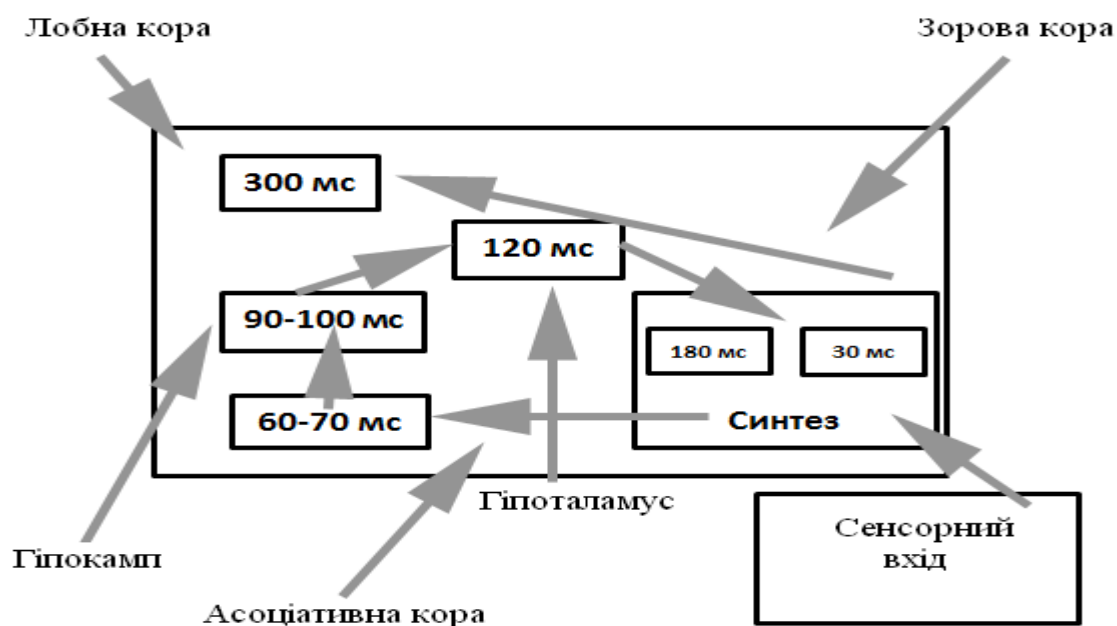


Рис. 5.16. Схема кільцевого руху зорової інформації.

Сприйнятий світловий стимул вже через 30 мс викликає збудження в зоровій корі, яке послідовно передається в асоціативні зони, гіпокамп, гіпоталамус і приблизно через 180 мс повертається назад, тобто повторно вводиться в зорову кору. Завдяки поверненню відбувається синтез, об'єднання двох видів інформації про стимул - його фізичних і сигнальних властивостей. Саме в цей час і виникає зорове відчуття, яке потім розпізнається за участю лобової кори [5.47].

Різниця полягає лише в тому, що місце сенсорного сигналу тут займає інформація, що зберігається в оперативній пам'яті. Провідна ж роль в процесах інформаційного синтезу належить не проекційній, як при виникненні відчуттів, а асоціативної корі.

При вирішенні різнотипних розумових завдань в різних ділянках кори виникають центри синтезу інформації, які в [5.47] названі «фокусами взаємодії» (рис. 5.17). У них оперативна інформація зіставляється з тією, що витягується з ДП і сигналами, які приходять з мотиваційних центрів, в результаті чого досягається кінцева мета розумового процесу. Наприклад, формування абстрактного образу при сприйнятті зорової інформації. Також було показано, що при завершенні будь-якого

розумового процесу в мовній лівій скроневій ділянці мозку появляється фокус збудження навіть тоді, коли словесна відповідь була не знайдена.

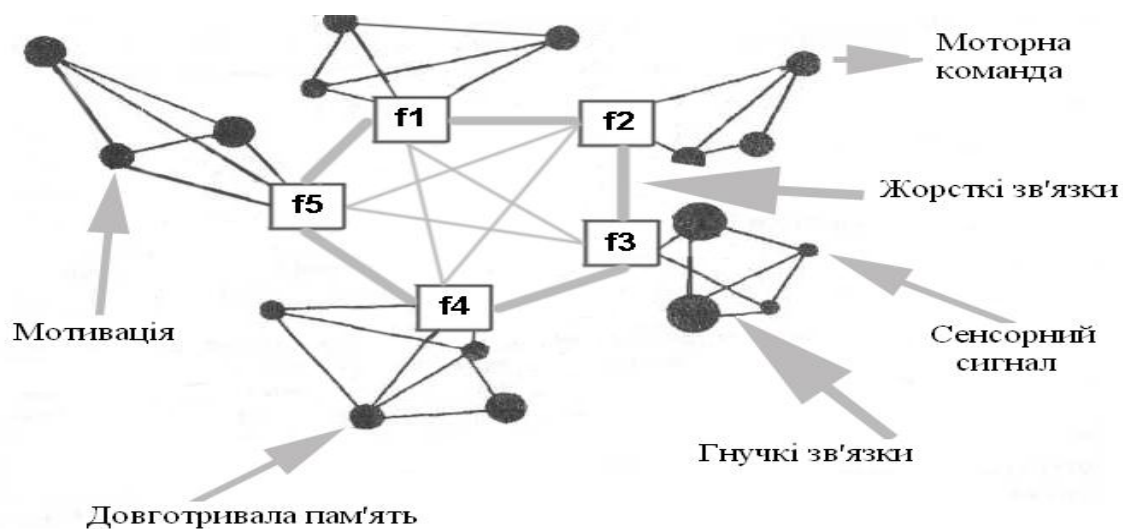


Рис. 5.17. Схема гіпотетичного фокусу взаємодії.

Фокус взаємодії - це коркове динамічне утворення, яке складається з декількох груп нервових клітин (f1-f5), що з'єднані між собою жорсткими зв'язками. Навколо такого жорсткого ядра є система гнучких зв'язків, що йдуть від нейронних груп з інших областей мозку, звідки фокусом приймається і синтезується інформація. Завдяки цьому і досягається вирішення тієї чи іншої розумової задачі [5.47].

Отже, вербалізація є необхідний компонент мислення людини в процесі усвідомлення інформації. Тобто вся інформація, що досягає рівня свідомості при осмисленні кодується мозком як мінімум двічі: у вигляді образів і їх вербальних аналогів. Коли ми щось розуміємо, ми це подумки бачимо, відчуваємо, словесно визначаємо. У цьому випадку пам'ять формується одночасно в обох півкулях. При відсутності подвійного кодування пам'ять відповідного коду формується і зберігається тільки в одній півкулі, ізолювано від іншого [5.48].

В результаті розумової діяльності з інформації, що надійшла, виділяється значуща частина, на основі якої будується програма усвідомленої поведінки.

5.10. Дослідження алгоритму програми поведінки шляхом вилучення і переробки інформації.

Вивчення процесів функціонування програм поведінки проводиться відповідно до потреб людини. Як відомо з щоденної життєдіяльності індивіда з навколишнього

середовища витягується, переробляється, фіксується в пам'яті корисна інформація. На підставі цієї інформації будується програма поведінки відповідно до обставин і потреб людини.

Більше того, в попередніх розділах даної роботи наводилися моделі, аналітичні докази і приклади роботи молекулярних запам'ятовуючих систем людини в рамках високоякісного програмного забезпечення (Рис.5.18).

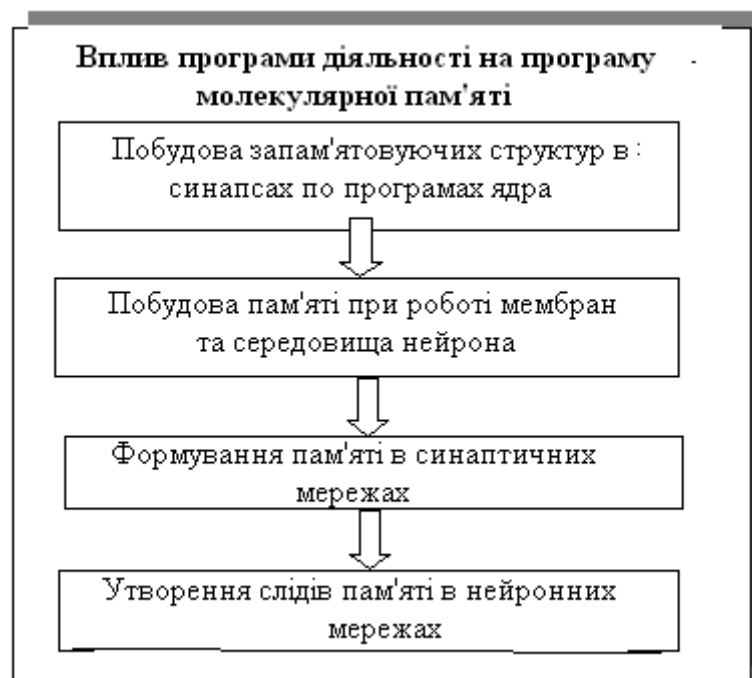


Рис.5.18. Залежність програми поведінки учня від програм роботи молекулярної пам'яті в ланцюзі: ДНК ядра -мембранний комплекс нейрона - синаптичні мережі- нейронні мережі.

Це стосується, в більшій мірі, величезного ієрархічного комплексу програмного забезпечення в системі ДНК ядра - середовище клітини. Дуже розвинена програмна підтримка спостерігається в системах: ДНК ядра -мембранний комплекс нейрона - синаптичні мережі -нейрони мережі.

Можна уявити масу ситуацій, коли ми мислимо зоровими ситуаціями, лише згодом оформляючи їх в слово. Причому переклад з «мови» образів на чужу їм мову свідомості навіть в оптимальному випадку не буває вичерпним. Якщо спробувати словесно описати конкретний предмет у відповідності з тим, що ми бачимо з усіма

подробностями, то можна переконатися, що це неможливо. Бо те, що ми бачимо - результат дії правої півкулі, а воно німе і висловити словесно реальний образ предмета не може. Дати словесний портрет може ліва півкуля, але в його свідомості зберігається абстрактний образ, і немає реального. Відповідним стає і наш опис предмета, причому у всіх воно буде різним, бо залежить від життєвого досвіду людини, його освіти та інших соціальних факторів.

Можливий і зворотний процес, коли абстрактний образ, що виїнятий з нашої пам'яті, який позначається словом, виявляється відразу ж представленим в правій півкулі за допомогою підобразів і просторових відносин у вигляді образу, що зберігається в її пам'яті та здатний уявитись візуально. Така уява називається репродуктивною. Природно, репродукція відрізняється від оригіналу, автором якого є природа.

Уява - найважливіша частина творчого процесу - відіграє величезну роль в перетворенні об'єктивного світу людиною. Без нього не можливо перетворити наші думки в реальність (Рис.5.19).



Рис.5.19. Схема процесу перетворення думки в реальність при творчому процесі.

Ліва півкуля здатна оперувати витягнутими з пам'яті основними ознаками зоро-

вих абстракцій, викликаючи відповідні процеси в правій півкулі, в результаті яких в нашій уяві виникають фантастичні образи, реально неіснуючі. Таке сприйняття називається творчим. Коли ми маємо справу з матеріальними об'єктами (електромагнітне поле, атом, молекула і так далі), безпосередньо не сприйнятими нашими органами почуттів, то створюємо абстрактні моделі, часто засновані на аналогіях, які в тій чи іншій мірі відображають властивості об'єкта. Створюючи предметну модель - аналог або її малюнок, ми формуємо зорові образи в правій півкулі, без якого, як з'ясувалося, не можуть порозумітися навіть фахівці цих галузей науки.

Якщо дати словесний опис предмета, то у кожної людини в уяві, якщо і виникає, то свій індивідуальний, в тій чи іншій мірі спотворений образ, бо навіть талантливий «перекладач» здійснити переклад з «мови» образів на чужу їй мову свідомості точно і повно не в змозі. Що стосується слухача цього перекладу, то він чує те, що хоче і може почути згідно своїм уявленням і потребам. Тут актуальним є положення про те, що краще один раз побачити, ніж багато разів почути.

Мова, яка сприймається слухачем несе інформацію двох видів. По-перше, це власне мовна або лінгвістична інформація (позначається також термінами мовна, семантична, вербальна). Носієм її є слово. По-друге, звукова мова передає слухачеві інформацію про вік того, що говорить, його поле, емоційний стан, фізичне здоров'я і т.п. незалежно від того, що говорить людини. Цей вид інформації називають екстралінгвістичною (позамовною). Носієм цієї інформації є характерні особливості мови і акустики голосу мовця: тембр, гучність, висота, інтонація, темп мови і т.п. Дуже часто при мовному спілкуванні більш важливим є не стільки, що говорить людина, скільки, хто говорить і як говорить. Не важливо, що сказано, важливо, як сказано [5.49].

Лінгвістичними здібностями володіє ліва півкуля, екстралінгвістичними - права. Конкретні образи формуються в правій півкулі, абстрактні - в лівій. Таким чином, обидві півкулі беруть участь у спільній переробці як мовної, так і образної інформації. Отже, усвідомленим буде будь-який фізичний процес або об'єкт, якщо в результаті спільної аналітико-синтетичної діяльності двох півкуль в лівій з'являється відповідний уявний або, що те ж саме, абстрактний образ. І чим він

досконаліший, тим достовірніше стає його мовний образ. Свідомість і самосвідомість людини також забезпечується спільною роботою двох півкуль, причому кожна півкуля вносить свою специфіку в реалізацію різної психічної діяльності. Основа свідомості лівої півкулі вербальна (понятійна свідомість), основа правої - наочно-образна (чуттєва свідомість). Дві якісно різні компоненти єдиної свідомості, дві стратегії мислення: абстрактного і образного, два результату мислення: вербалізація і уява, є формами суто людських властивостей мозку.

Другою сигнальною системою позначають функцію мозку, яка має справу зі словесними символами, «сигналами сигналів», які відображають в узагальненому вигляді, у вигляді понять навколишній світ.

В роботі свідомості проявляється надзвичайно важлива особливість - уривчастість. Наші почуття дають нам світ у витягах, важливих для нас. Свідомість як би стрибками рухається за природою, з пропусками, пробілами. Усвідомити - значить отримати можливість повідомити, передати знання іншим. А все те, що неможливо передати іншим - неусвідомлено (рис.5.20).

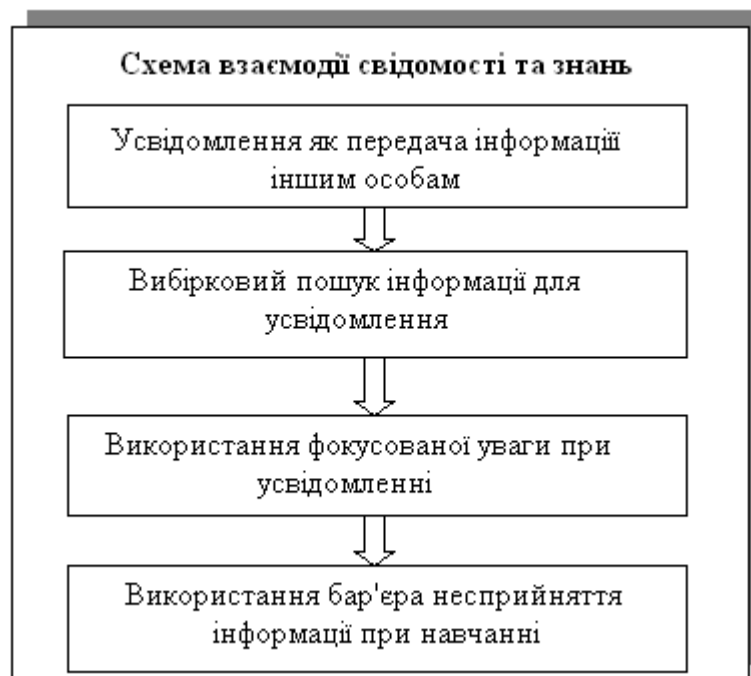


Рис.5.20. Схема взаємодії свідомості і знання.

Процес включення роботи півкуль є поліциклічним [5.50]. Коли домінує ліва, то результати розумової діяльності, досягнуті до цього моменту, можуть бути

вербалізовані і усвідомлені. Коли домінує права, розумовий процес, розвиваючись іманентно, не може бути усвідомлений і вербалізований. І тільки, коли знову домінує ліва, виникає відчуття раптовості отриманого результату. У таких випадках зазвичай вважається, що рішення знайдено інтуїтивно. Ймовірно, в ці моменти ми відчуваємо труднощі в словесному оформленні думки.

Велика частина сприйнятої інформації не досягає сфери свідомості, яка формується в лівій півкулі на вербальній основі. Можна визначити свідомість, як знання, яке за допомогою слів, математичних символів і узагальнених образів художніх творів може бути передано, може стати надбанням інших членів суспільства [5.47]. Психіка вибирає стійкі точки дійсності серед загального руху [5.51]. Основним психофізіологічним інструментом, за допомогою якого відбувається подібний відбір інформації для свідомості, служить механізм вибіркової або фокусованої уваги [5.50].

Таким чином, зазначені вище дослідження дозволили визначити умови, при яких зовнішня інформація не досягає свідомості, але може бути зафіксована в довготривалій пам'яті. Це інформація, що викликає нейронну активність у корі тривалістю менш сотень мілісекунд, інформація, що викликає негативні емоційні переживання, що підвищують поріг її сприйняття, який здатний перерости в психологічний бар'єр повного її неприйняття. Останнє є досить розповсюдженою ситуацією, що виникає в існуючих умовах навчання.

Розглянемо роль пам'яті підсвідомості, яка перевищує в багато разів пам'ять свідомості. Об'єм пам'яті, що зберігає усвідомлену інформацію - це лише незначна верхівка айсберга нашої пам'яті, велика частина якого прихована від нас в глибинах нашого розуму.

Крім того, при формуванні та зміцненні автоматизованих навичок все більша частина інформації, що надходить ззовні, не доходить до свідомості, а обробляється і переключається на еферентну систему на більш низьких рівнях нервової організації [5.52]. У дорослої людини формується до двох тисяч автоматизованих навичок (рис. 5.21). Наш мозок являє собою складну біосистему для переробки та зберігання інформації, в якій ці процеси можуть протікати усвідомлено і несвідомо.

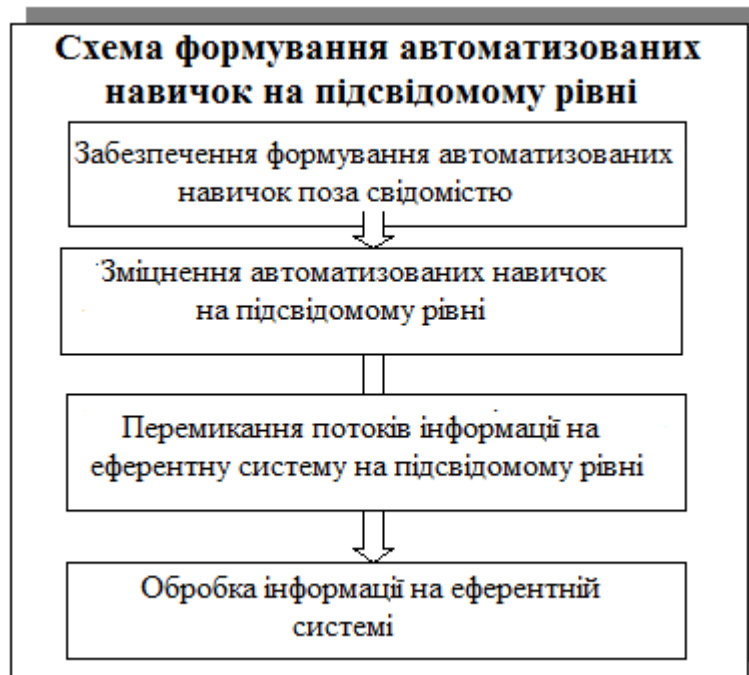


Рис.5.21. Схема формування автоматизованих навичок на несвідомому рівні.

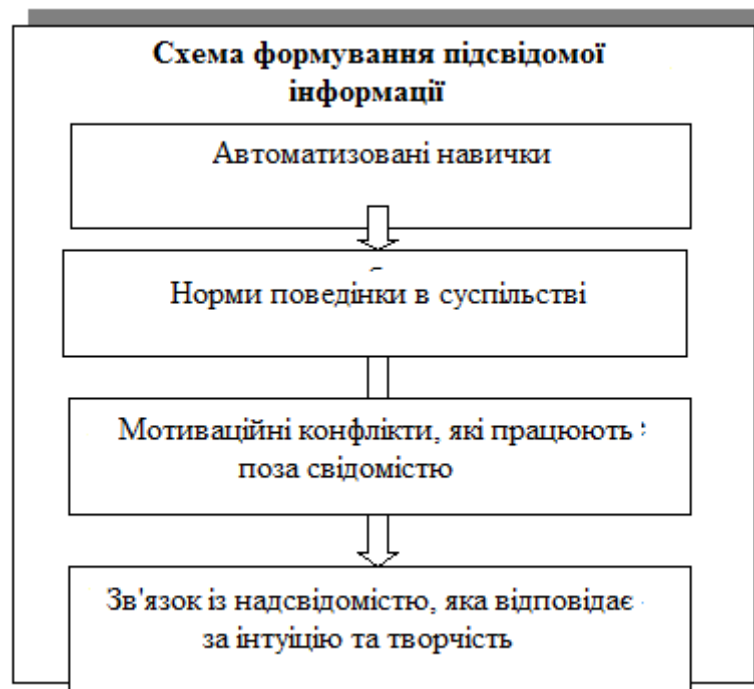


Рис.5.22. Схема формування підсвідомої інформації.

Роль неусвідомлюваних нервових процесів в роботі головного мозку надзвичайно важлива. Вони приймають участь у формуванні нашої поведінки, їх прихована

робота проявляється в нашій пізнавальній діяльності. Їх можна виявити в наших реакціях на події, що відбуваються в навколишньому середовищі (рис.5.22). Сфера несвідомого, як зазначається в [5.52] ділиться на підсвідомість і надсвідомість. Як видно з рис.5.22 змістом підсвідомості є різні автоматизовані навички.

Глибокозасвоєні людиною норми поведінки та мотиваційні конфлікти є витиснуті зі сфери свідомості.

Підсвідомість оберігає людину від зайвих витрат енергії, захищає від стресу. Підсвідомість людини, особливо в дитячому віці, сприймає всю інформацію, що надходить ззовні інформацію буквально. Почута учнем на педагогічній раді репліка «Він не може вчитися далі», сказана в присутності його батьків, може бути засвоєна і виконана його підсвідомістю, тим більше, що при сильному емоційному напруженні сугестивність підсилюється. І тоді вже точно на освіту дитини, незалежно від його дійсних здібностей, можна ставити хрест [5.53].

Надсвідомість або інтуїція зв'язані з процесами творчості, які не контролюються свідомістю. Надсвідомість - джерело нової інформації, гіпотез, відкриттів (Рис.5.23).

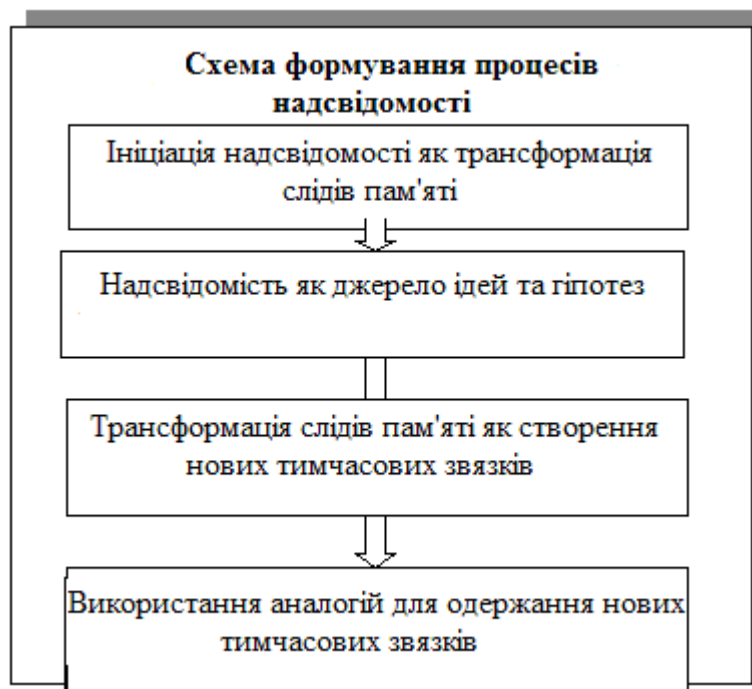


Рис.5.23. Схема функціонування надсвідомості і інтуїції для процесів творчості.

Таким чином, дуже важливим є положення про те, що дитяча підсвідомість лег-

ко підхоплює необережну репліку, перетворює її в ідею фікс і реалізує згодом як постгіпнотичне навіювання [5.49]. Його нейрофізіологічна основа - трансформація слідів пам'яті, створення нових тимчасових зв'язків, породження аналогій. За свідомістю залишається функція відбору гіпотез на основі логічного аналізу. Отже, функція правої півкулі ототожнюється з інтуїтивним мисленням, яке відіграє найважливішу роль в появі наукових відкриттів і в створенні творів мистецтва.

З огляду на наведені вище положення про місце надсвідомості у формуванні мети, правій півкулі належить провідна роль в породженні цілей, а ліве уточнює засоби їх досягнення [5.52].

5.11. Дослідження механізмів молекулярної пам'яті в природних молекулярних машинах організму людини.

За останній десяток років слід відзначити значний прогрес у мініатюризації медичної техніки: з'явилася достатня кількість практичних розробок мікропристроїв, здатних керувати на відстані сенсорами, джерелами енергії, складальниками і передатчиками зібраної інформації про організм людини. Серед таких пристроїв свою нішу зайняли специфічні пристрої - нанороботи, що створюються на наноелектронних структурах, а також за допомогою біотехнологій [5.54-5.59].

Визначення нанороботів як керованих на відстані сенсорів, приведені вище, має значні підстави у зв'язку з досягненнями в розробці «інтелектуальних» програмованих сенсорів різного призначення, і, особливо, для діагностики і лікування людини на молекулярному рівні за допомогою наномедицини [5.60-5.63].

Медичні нанороботи є кібернетичними пристроями нанометрових розмірів, виготовлені з атомарною точністю. Такі нанороботи здатні функціонувати в організмі людини, виконуючи контрольовану корекцію молекулярних і клітинних процесів. В даний час не існує теоретичних бар'єрів, що перешкоджають створенню такого роду пристроїв з широким спектром функцій. Сучасний рівень розвитку нанотехнології дозволяє конструювати автономні медичні нанороботи, зокрема, пристрої для контролю рівня глюкози в крові (перспективи використання - при моніторингу діабетичних хворих) і для вироблення інсуліну. У той же час, методами

молекулярного моделювання продемонстровані можливості створення на порядок більш складних систем: штучних фагоцитів, еритроцитів і т.п.

Комплекс досліджень, пов'язаних з нанотехнологіями, називається "NanoBioInfoCognito". Такі нанотехнології пов'язані з геноінженерними, інформаційними і когнітивними технологіями (технологіями пізнання). На цьому стику народжуються нові напрямки прикладної математики, що дають принципово нові можливості. Їх називають біообчисленнями або нейронаукою [5.64].

І все ж найбільший практичний ефект від застосування спеціальних мікропристроїв у вигляді нанороботів в медицині може мати місце, коли зможуть використовуватися створені надмініатюрні пристрої розмірами в декілька нанометрів з молекулярної пам'яттю.

Необхідно відзначити, що в дуже великій кількості діагностичні природні молекулярні машини успішно використовуються в організмі людини. Такі молекулярні машини, не тільки вільно переміщаються всередині наших артерій, роблячи при цьому діагностику і ремонт організму зсередини, а виконують безліч функцій із забезпечення функцій роботи організму (обмінні, імунні, нейронномережеві, репродуктивні і ін. процеси).

Для штучних молекулярних і наномашин характерні принципово нові ефекти в порівнянні з природними нанопристроями. Серед них: квантові ефекти, статистичні тимчасові варіації властивостей і їх масштабування в залежності від розмірів структур, переважне використання ефектів зі зміни характеристик поверхні, відсутність дефектів в обсязі монокристалів, значна енергонасиченість, що визначає високу активність в хімічних реакціях, процесах сорбції, окислення і т.п. Ці властивості відкривають двері в принципово нову область маніпулювання матерією з додатками, які важко уявити у звичайній ситуації.

При дослідженні природних нанопристроїв слід зазначити, що здатність молекул самоорганізовуватися в структури різного функціонального призначення, а також відтворювати самих себе є закладеною в них програмою і основною рисою, що дозволяє функціонувати молекулярним машинам в організмі людини.

Хоча на основі наноелектроніки вже реалізовані зразки наноструктурованих надтвердих, надлегких, корозійностійких і зносостійких матеріалів і покриттів, каталізаторів з високорозвиненою поверхнею, нанопористих мембран для систем тонкого очищення рідин і надшвидкісних приладів [1.3,5.65,5.66], до досягнення рівня природних молекулярних машин необхідні значні зусилля різних груп дослідників.

Одним з перспективних напрямків досліджень може бути дослідження функціональних можливостей природних нанопристроїв у вигляді біонанороботів. Так, очищенням судин від холестеринових бляшок, відновленням нейронних зв'язків у мозку і різними профілактичними функціями успішно займаються природні і вірусоподібні структури у вигляді специфічних біонанороботів, таких як: молекулярні біонанороботи у вигляді ферментів і антитіл; рибосоми - комплексні біороботи для синтезу пептидів; біонанороботи, які обслуговують ДНК у вигляді полімераз, транскриптаз, тіломераз; біонанороботи, які обслуговують РНК; репаразні комплекси та захисні системи клітини; мембранні біонанороботи.

При такому підході до вивчення проблеми функціонування нанороботів з наступним створенням штучних прототипів необхідно ретельно вивчити технологічні можливості відтворення за допомогою методів нананотехнологій хоча б окремих блоків природних нанороботів, які ефективно справляються зі своїми завданнями діагностики і лікування організму людини самостійно. Одне з найважливіших питань, що стоять перед нанотехнологією, полягає в тому, як змусити молекули групуватися певним способом, самоорганізовуватися, щоб у підсумку отримати нові матеріали або пристрої. Цією проблемою займається розділ хімії - супрамолекулярна хімія. Вона вивчає не окремі молекули, а взаємодії між молекулами, які, організуючись певним способом, можуть дати нові речовини. Обнадіює те, що в природі дійсно існують подібні системи і здійснюються подібні процеси. Так, відомі біополімери, здатні організовуватися в особливі структури. Один із прикладів – пептиди, які не тільки можуть згортатися в глобулярну форму, а й утворювати комплекси - структури, що включають кілька молекул протеїнів (пептидів). Уже зараз існує метод синтезу, який використовує специфічні властивості молекули ДНК. У

зв'язку з розвитком напрямку наукових досліджень нанороботів, зараз найбільш гостро стоять питання їх конкретного проектування, такі як зондування, силові зв'язки між молекулами, навігація, інструментарій для маніпуляцій, руховий апарат, молекулярні мотори, бортовий комп'ютер, призначений для вирішення медичних завдань. Хоча значна частина цих завдань ще не вирішена, вже створена фірма для співпраці по розробці нанофабрик [5.67], діяльність якої зосереджена на розробці практичних досліджень, спрямованих на створення контрольованої алмазної механосинтетичної нанофабрики, здатної до виробництва медичних нанороботів на основі алмазних сполук.

5.12. Вивчення молекулярних систем в нейроні за наявною програмою і молекулярною пам'яттю.

Можливість створення наносистем, здатних мати функції нанороботів може бути реалізована за допомогою програми NanoXplorer компанії nanoTITAN [1.11]. За принципом роботи така програма близька до інженерної програмі AutoCAD, за допомогою якої розробляють нові машини і механізми, в т.ч. і мікроелектронні пристрої. Подібний підхід корисний при конструюванні нанопристроїв, здатних виконувати функції нанороботів. Також всі специфічні біохімічні взаємодії свідчать, що молекулярні системи можуть розпізнавати інші молекули при зіткненні, будувати або перебудовувати кожену молекулу в клітині, і можуть розбирати пошкоджені молекули. Нарешті, існування клітин, що розмножуються, доводить, що молекулярні системи можуть збирати кожену систему, яка є в клітині. Отже, природа демонструє прості операції, які потрібні для ремонту клітини на молекулярному рівні. В майбутньому системи на базі наномашин будуть побудовані так, щоб вміти входити в клітини, знаходити відмінності зі здоровою клітиною, і вносити модифікації в структуру.

Медичні можливості таких машин ремонту клітин вражають. За розміром вони порівнянні з вірусами або бактеріями, а їх компактні частини можуть допомогти їм бути більш складними і спеціалізованими. Проходячи через мембрани, подорожуючи через тканини і входячи в клітини і віруси, машини можуть ремонтувати якесь молекулярне пошкодження на зразок ушкодження ДНК або брак ензимів. Піз-

ніше, молекулярні машини будуть запрограмовані на більшу кількість можливостей за допомогою просунутих систем ШІ.

Нанокомп'ютери будуть потрібні, щоб керувати цими машинами. Ці комп'ютери будуть давати машинам команди оглядати, розбирати і перебудовувати пошкоджені молекулярні структури. Машини ремонту зможуть ремонтувати цілі клітини, структуру за структурою. Далі, обробляючи клітину за клітиною, тканину за тканиною, зможуть відремонтувати цілі органи.

Доставка ліків фокусується на максимізації біодоступності в специфічних місцях тіла, а також протягом певного періоду. Це потенційно може бути досягнуто молекулярним націлюванням наноінженерних пристроїв. Це все передбачає націлювання на молекули і доставку ліків з точністю до клітини. Нові методи, пов'язані з розробкою наноінженерних матеріалів, можуть бути ефективні в лікуванні онкологічних захворювань.

Можуть з'явитися самозбираючі біосумісні нанопристрої, які будуть виявляти, оцінювати, лікувати і повідомляти результат лікарю автоматично. Розроблені для обходу механізмів захисту організму наночастинки мають властивості, які можуть поліпшити доставку ліків. Там, де більші частинки можуть вилучатися з тіла, клітини приймають наночастинки згідно їх розміру. Ефективність важлива, оскільки багато захворювань залежать від процесів в клітині і можуть бути зупинені тільки ліками, проникаючими в клітину. Стимульована відповідь - це одна з можливостей більш ефективно використовувати молекули ліків. Ліки поміщаються в тіло і активуються лише за специфічним сигналом. Наприклад, ліки з поганою розчинністю буде заміщено системою доставки ліків, в якій присутні гідрофільні і гідрофобні компоненти, що покращує розчинність. Також ліки можуть викликати пошкодження тканин, але за допомогою системи доставки регульований випуск ліків може вирішити проблему. Якщо ліки занадто швидко видаляються з тіла, це може вимагати від пацієнта приймати великі дози, але з системою доставки ліків видалення може бути зменшено із допомогою зміни фармакокінетики ліків. Поганий біорозподіл - це проблема, яка може торкнутися нормальних тканин через розподіл ліків по всьому організму, але аерозолі систем доставки ліків можуть скоротити розподіл і знизити

вплив на нецільові тканини. Потенційні наноліки працюватимуть по дуже специфічним і добре зрозумілим механізмам; одним з головних напрямків нанотехнології і нанонауки є розробка абсолютно нових ліків з більш корисною поведінкою і меншими побічними ефектами.

Важливо відмітити при вивченні механізмів взаємодії молекулярних систем в нейронах з відповідною наявною програмою та молекулярною пам'яттю в останніх наявність інформаційно - енергетичних рівнів метаболізму молекулярних систем на рівні ферментних комплексів.

Як вказувалось вище (розд.5.5) в [5.68,5.69] на основі математичної моделі просторової взаємодії термохімічних потенціалів на основі рівнянь загальної теорії відносності можна отримувати інтегральний показник рівня молекулярного метаболізму, зокрема при роботі програм ядерних комплексів нейрона зі структурами молекулярної пам'яті. Термохімічний потенціал протікаючої хімічної реакції змінює структуру навколишнього простору (кривизна, метричний тензор). Ці зміни передаються через будь-яке матеріальне середовище і є фізичною основою для інформаційного поля живих організмів. Така гіпотеза дозволяє не тільки пояснити зв'язок електропровідності в біологічно активних точках (БАТ) зі станом фізіологічних систем, а й використовувати інші фізичні параметри, або їх поєднання як для діагностики, так і для правильного лікувального впливу на БАТ.

Так, в [5.70] підтверджена інформативність магнітометричного сигналу, знятого не тільки з органів, що мають власні електричні струми, а й з БАТ. Існує також клас приладів у вигляді електронних магнітотерапевтичних пристроїв, здатних здійснювати стимуляцію магнітним полем рефлексогенних зон або БАТ при магнітопунктурі. При цьому здійснюється безпосередній терапевтичний вплив імпульсним магнітним полем на органи і тканини людини [5.71]. Ефективність зазначених приладів визначається конструкцією підсилювачів, які характеризуються коефіцієнтом корисної дії, а також режимами роботи активних компонентів підсилювача і магнітного поля (індукція, частота, полярність, геометричні характеристики) в індукторі, створюваного струмом, що протікає через його обмотку.

Однак, зазначені прилади не враховують деякі аспекти взаємодії інформаційного поля і організму, тому не дозволяють виробляти енергетичну корекцію фізіологічних систем на різних рівнях, що дозволило б не тільки лікувати хворих, а й проводити розблокування інформаційно - енергетичних рівнів метаболізму молекулярних систем на рівні ферментних комплексів, що в свою чергу, стало б профілактикою хвороби, що насувається. Важливо також розуміти зв'язки параметрів інформаційного поля організму з характером патології. Так, заслуговує на увагу підхід, при якому виникнення хвороби проходить в три етапи [5.72]. На першому етапі відбувається блокування необхідних фізіологічних процесів в організмі людини на інформаційно-енергетичному рівні, яке може протікати до 6 місяців і більше. На другому етапі вже блокуються енергетичні канали, що викликають порушення життєдіяльності систем організму на клітинному рівні. І, нарешті, на третьому етапі проявляється безпосередньо сама хвороба з властивою їй симптоматикою.

Різні форми взаємодії клітинних і молекулярних структур між собою були частково описані на рівні знань свого часу ще в ранніх роботах китайських дослідників, потім вже ці знання модифікувалися для рівня сучасного наукового розуміння, наприклад [5.73]. Однак до цих пір мало враховується польова компонента при регуляції роботи фізіологічних систем різного рівня. Сучасний рівень досліджень в області, як молекулярних і клітинних структур, так і систем організму на рівні органів, дозволяє говорити про польову взаємодію геномів клітинних структур один з одним, а також про керуючий польовий вплив на геном різних структур, що знаходяться всередині людського організму [5.74].

5.13. Висновки.

1. Здатність молекулярної пам'яті людини зберігати величезні обсяги інформації пояснюється особливою організацією її зберігання, яка не може бути зведена до механічного запам'ятовування одержуваної ззовні інформації. Ця інформація, будучи інформацією першого нижчого рівня, служить матеріалом для формування в результаті складних розумових процесів, зв'язків та відносин між явищами і предметами, тобто класифікації, формування образів, понять, створення структурованої інформації другого вищого рівня, тобто знань. Саме на цьому рівні зберігається інфо-

рмация в пам'яті людини, саме цим пояснюється її великий обсяг і ефективність її використання при дуже скромних можливостях в частині обсягу пам'яті і її швидкості.

2. Обробка людиною одержуваної інформації є функцією мозку і лежить в основі процесів мислення, що складаються з двох основних функцій. Першою функцією є вироблення на основі одержуваної ззовні інформації знань, тобто засвоєння і використання деякої кодуєчої системи, що дозволяє раціонально зберігати і ефективно використовувати інформацію у вигляді молекулярної пам'яті. Друга функція відноситься до використання знань і обробки на основі наявних знань одержуваної ззовні інформації.

3. Запропоновано інформаційну модель нейрона як мікропроцесора, що працює в нейронних і синаптичних мережах при навчанні. Нейрон подібний до електронного мікропроцесора, оскільки він отримує на свої дендрити тисячі сигналів і постійно інтегрує всю вхідну інформацію. На відміну від мікропроцесора, що володіє безліччю вихідних контактів, нейрон має всього один вихід, свій аксон. В результаті нейрон може реагувати на вхідні сигнали тільки одним способом: він може або вирішити послати сигнал до наступного нейрона в ланцюзі, розрядившись імпульсом і направивши його на свій аксон, або нічого не зробити. Безліч синапсів, що припадають на один нейрон, спрацьовують одночасно (за інтегральною командою, сформованою сигналами з самих синапсів, ядра і мотиваційного блоку), їх спільні зусилля настільки різко змінюють потенціал нейрона, що змушують його розрядитися потенціалом дії і передати сигнал наступному нейрону у ланцюзі.

4. Представлена інформаційна модель інтеграції рецепторно-процесорних комплексів в ієрархічні ланцюги, що дозволяє об'єднати окремі програмні фрагменти дій в більш складний комплекс цілеспрямованих актів при формуванні молекулярної пам'яті. Об'єднання програмних ділянок процесорів в ієрархічні ланцюги різного ступеня складності відбувається при тісному рецепторному супроводі процесорних комплексів.

5. Отримано та вивчено алгоритм побудови синаптичних і нейронних мереж з використанням нейронних представників. Показано, що велика кількість нейронів,

що підлягають об'єднанню на основі асоціативних зв'язків, неможливо зібрати в компактні структури без порушення всієї сформованої схеми мозку. У зв'язку з цим використовуються функції нейронних представників як копій нейронів якості жорсткого типу, що мають з ними прямий зв'язок, але віддалених від основних утворень на необхідну відстань. Такий підхід дозволяє не змінювати вже створені мозкові структури і призводить до формування структур кори головного мозку.

6. Створено інформаційну модель програмного контролю ядра за процесами навчання людини. Обґрунтовано явище експресії ранніх генів в клітинах нейронів, яке залежить від минулого досвіду індивіда і визначається фактором суб'єктивної новизни даної події. При цьому фактор новизни може бути представлений елементарною одиницею системи навчання. Індивідуальний досвід учня контролюється системною пам'яттю мозку спільно з молекулярної пам'яттю на структурах ДНК-РНК.

7. Вивчена та досліджена модель механізму розуміння сенсу сказаного через структуру поняття при формуванні молекулярної пам'яті. Для здійснення розуміння поверхневої структури, самого сенсу сказаного і прихованої структури вираження в мозку існує психологічний апарат, який здійснює розуміння і носить умовну назву - апарат для аналізу пропозицій (ААП). ААП починає з допущення, що пропозиція буде мати наступний порядок: суб'єкт, дієслово, об'єкт; якщо пропозиція має не такий порядок, розуміння часто сповільнюється. Але ААП також покладається на кілька інших підказок, коли функціональні слова використовуються як ключі до структури пропозиції. Тому нове знання може входити в стару систему понять і виражатися за допомогою відомих слів.

8. Створено модель впливу ядерних генетичних програм нейрона у формуванні молекулярної пам'яті. Показано, що картина світу учня формується шляхом взаємодії двох потоків інформації, що йдуть через генетичну програму, закодовану в молекулах ДНК і з урахуванням впливу факторів середовища, що визначають умови роботи зазначених генетичних програм. У процесі засвоєння знань відбувається фізична перебудова нервових мереж мозку, в результаті якої формуються динамічні, постійно оновлювані нейронні карти зовнішнього світу і подій, що відбуваються в ньому.

9. Створена модель контролю енергетичних характеристик у вигляді вимірювань електропровідності і магнітного поля в рефлексних-сенсорних модулях на поверхні тіла людини. Зазначена модель дозволяє говорити про термохімічний потенціал в клітині, як індикатор молекулярної пам'яті. Зазначені модулі обробляють інформацію по типу відомих біологічно активних точок. Сучасний рівень досліджень дозволяє говорити про польовому взаємодію геномів клітинних структур, як один з одним, так і про керування генними структурами на програмному рівні життєдіяльності клітин, тканин і органів людини.

РОЗДІЛ 6. МОДЕЛІ І МЕТОДИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ У ЗАПАМ'ЯТОВУЮЧИХ СТРУКТУРАХ НЕЙРОНІВ ТА ЇХ ЯДЕРНИХ КОМПЛЕКСАХ.

6.1. Аналіз роботи молекулярних структур нейронів на рівні - генні системи - синапси.

Вивчаючи процеси керування в наносистемах, які представлені в клітині організму людини, з точки зору кібернетичних підходів, знову і знову приходиться звертатися до початкової ситуації про проблему визначення місця людини в природі. І тут на першому місці ми стикаємося з витоками визначень інформаційних процесів, закладених в картині світу, як окремої людини, так і соціуму взагалі. Доводиться аналізувати закони світу, які розкриваються нам через відчуття, вбудовані в код ДНК. При цьому, важливим моментом є уявлення про те, що живі клітини керуються молекулярними комп'ютерами, а вплив обчислень на керування клітиною врахований в молекулярних програмах, записаних на ДНК.

Молекулярною машиною клітини нейрона будемо представляти нанопристрій з оптимальними керуючими і обчислювальними властивостями для вирішення завдань нейрона.

Для розвитку цього напрямку досліджень з'явилася нова наука - нанонаука на основі математики, фізики та біології. Головна ідея цієї нової науки полягає в тому, що реальний світ, в якому ми живемо, це зовсім не закономірний фізичний світ, а світ, який знаходиться в постійному процесі вивчення з алгоритмом «оптимального» керування людським розумом. Оскільки реальне управління неможливо без вимірювання і передобчислювання майбутнього, необхідно прийняти відповідні умови досліджень об'єкта досліджень - нашого світу. Щоб вплив вимірювання був би мінімальним, важливо прийняти положення, що світ представлений дуалістичними положеннями, як ньютонівськими, так і квантово-хвильовими.

Можна припустити, що в основу світу покладено принцип визначеності. Принцип невизначеності є лише наслідком принципу максимальної визначеності і керованості реального світу для розуму. Тому що не тільки вимір, а й передобчислювання за допомогою молекулярних квантових комп'ютерів змінює майбутнє [6.1-

6.3]. Цей вплив, що не істотний для проблем, що вирішуються сучасною фізикою, дуже важливий для клітини, оскільки молекулярні квантові комп'ютери знаходяться всередині живих клітин і керують їхньою роботою. Вплив обчислень на завдання, як зазначалося вище, враховано в молекулярних програмах, записаних на ДНК [6.3].

6.2. Подання процесу обчислень для керування нейроном за допомогою молекулярних програм, записаних на ДНК.

Важливими етапами на шляху розуміння роботи нервової системи на молекулярному рівні є дослідження процесу кодування в нервовій системі [6.4]. Такий підхід дозволив експериментально довести, що енергетика всього живого є хіміко-електричною і обґрунтувати роботу молекулярного трансформатора «молекулярної» електрики, що працює з одиночними електронами. Такі дослідження підтвердили процеси, за допомогою яких клітини керуються молекулярними комп'ютерами. Експериментальними методами було показано, що молекулярні обчислювальні машини нейронів здатні керувати генерацією нервових імпульсів. При цьому нейрон при обробці інформації використовує обчислення із застосуванням квантово-хвильових властивостей матерії. Іншими словами, нейрон може бути, як клітина також представлений молекулярним нанопристроєм з оптимальними керуючими і обчислювальними властивостями [6.4].

Тут хотілося б окремо зупинитися на основному положенні роботи ієрархії молекулярних машин в нейроні, а саме на постулаті про організацію обчислень при керуванні нейроном за допомогою молекулярних програм, записаних на ДНК.

Постулат 1. Організація «обчислень» для керування нейроном здійснюється за допомогою молекулярних програм молекулярної пам'яті, записаних на ДНК.

Викладемо основні положення, які впливають з функціонування даного постулату. Так, в разі ідентифікації молекулярного комп'ютера клітини квантово-молекулярним пристроєм, представляється зрозумілим процес прийняття клітиною рішень, який є вимірюванням і передобчислюванням майбутньої події. Недотримання цієї умови неминуче призведе до зміни самого рішення. Такий підхід багато в чому пояснює поняття програмованих рефлексивних подій.

Молекулярний комп'ютер в клітині працює з системою ДНК, РНК і адресних пептидних операторів, використовуючи в процесі обчислення тепловий броунівський рух цих молекулярних структур. Необхідно звернути увагу на фізичні обмеження обчислювального процесу в молекулярному комп'ютері і на те, що не враховується квантовою механікою вплив процесу вимірювання на молекулярні вимірювальні прилади в живих клітинах. Розвиток генної інженерії показав, що такий молекулярний комп'ютер керує живими клітинами [6.4].

Використання кібернетичного підходу в розумінні молекулярно-генетичних механізмів обробки інформації в природному інтелекті людини дозволяє проводити аналіз роботи підсистем молекулярного комп'ютера клітини шляхом використання формалізму у вигляді методу узагальнених граничних моделей [6.5]. Названий формалізм здатний досліджувати динаміку молекулярних систем керування як метаболічними, так і онтогенетичними процесами. При цьому кібернетичний підхід опису молекулярних механізмів обробки інформації дозволяє наблизитися до розуміння таких процесів, як запам'ятовування інформації в молекулярних структурах синаптичних мереж [6.6-6.8]. Використання наведеного вище формалізму дає можливість прогнозувати якісну і кількісну динаміку генних мереж, які керують життєвими процесами, а також вирішувати завдання структурної, зокрема параметричної, стійкості моделей генних керуючих мереж [6.9-6.11].

Будь-яка клітина біосистеми є системою кодуючих полімерів (ДНК, РНК, білків) і метаболічних систем (білки, ліпіди, цукри, йони металів) [150]. У всякій системі завжди можна виділити керуючу і керовану підсистеми, при цьому закони динаміки цих підсистем різні і описуються для керуючих підсистем дискретними виразами, а для керованих - на мові теорії диференціальних рівнянь [6.9].

Використання такого формалізму дозволяє прогнозувати динаміку генних мереж, які керують життєвими процесами, а також вирішувати завдання структурної, зокрема параметричної, стійкості моделей генних керуючих мереж [6.9-6.11].

Таким чином, в клітинах можна виділити керуючу систему у вигляді генної мережі і керовану систему у вигляді генетичних елементів і синаптичних мереж, що містять в собі пристрої зберігання інформації, інформаційні сигнальні процеси і мо-

лекулярні носії інформації в керуючій генній мережі [6.12]. Керуючі генні мережі мають дві основні функції: управління швидкими метаболічними процесами синтезу і переробки молекулярних компонент, а також керування більш повільними онтогенетичними процесами, що приводять до самовідтворення.

Метод узагальнених граничних моделей (Generalized Threshold Models) використовується як GTM-формалізм для аналізу динаміки керуючих і керованих молекулярно-генетичних систем [150] (рис. 6.1).

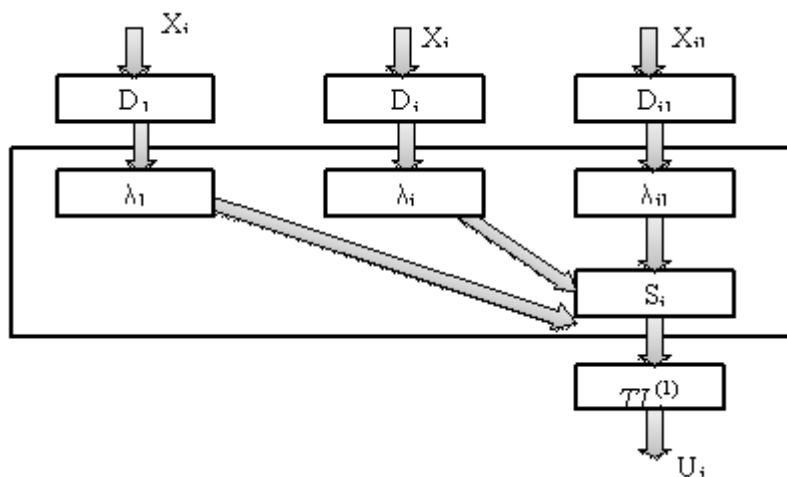


Рис.6.1. Мегасистема клітини з керуючою і керованою підсистемами генних мереж: $x_i(t)$ -концентрація регуляторної речовини, D_i - дискримінатор. Дискримінатор переробляє безперервні величини $x_i(t)$ в дискретні бінарні величини $\varepsilon_j(t)$ таким чином, що $\varepsilon_j(t) = H[x_i(t) - P_{ij}]$, де H - функція Хевісайда, P_{ij} - порогове значення концентрації, $\lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_j$ - елементарні підавтомати автомата L_j , S_j - комбінаційна схема (комбінатор двійкових сигналів), $T_j^{(1)}$ - елемент затримки, U_j - керуючий вектор.

Цей метод враховує специфіку процесів керування на молекулярному рівні, дає можливість отримувати як якісні, так і кількісні картини динаміки генних мереж довільної складності. Основна ідея GTM-формалізму полягає в поділі мегасистеми клітини на керуючу і керовану підсистеми, що дозволяє більшу систему нелінійних диференціальних рівнянь для молекулярних компонент звести до кусочно-лінійної системи рівнянь, права частина якої містить керуючий вектор $U_j = U_j(t)$, що формується дискретним логічним елементом L_j .

У випадку, коли молекулярна система кодує полімерів і метаболітів, містить одну копію геному і керування виробництвом j -го білка здійснюється на рівні транскрипції, були отримані рівняння динаміки такого вигляду [6.9]:

$$\begin{aligned}\dot{M}_j &= A_{1j}U_j - B_{1j}M_j, \\ \dot{r}_j &= A_{2j}^T M_j - b_{2j}r_j,\end{aligned}\tag{6.1}$$

де M^j , U^j - стовпці розміром $n^j \times 1$; A^{1j} , B^{1j} - діагональні матриці розміром $n^j \times n^j$; A_{2j}^T - рядок розміром $1 \times n^j$; r^j , b^{2j} - скалярні величини, причому компоненти $m_i^{(j)}$ вектора-стовпця M^j означають поточну концентрацію, виміряну числом молекул на клітину, транскриптів j -ї фракції, що містять j -й цистрон (ділянку ДНК); $U^j = U^j(t)$ - керуючий вектор, що формується логічним елементом і елементами затримки даного блоку; діагональний елемент a_{jj}^{1j} матриці A^{1j} означає одиничну інтенсивність транскрипції, яка починається з однієї копії j -го промотора (стартової ділянки транскрипції ДНК); відповідно компонента a_j^{2j} рядка A_{2j}^T - одинична інтенсивність трансляції з j -го транскрипта; діагональний елемент b_{ii}^{1j} матриці B^{1j} - одинична інтенсивність (коефіцієнт) деградації j -го транскрипту; b^{2j} - коефіцієнт деградації j -го поліпептиду.

Використовуючи GTM-формалізм [6.9] можна прийти до рівняння динаміки наступного виду (6.2):

$$\begin{aligned}\dot{m}_j^{(0)}(t) &= \sum_{l=1}^{k_j} a_{lj} u_{lj}(t) - b_{1j} m_j^{(0)}(t), \\ m_j^{(\vartheta)}(t) &= \begin{cases} m_j^{(\vartheta-t)}(0), & \text{якщо } t \leq \vartheta, \\ m_j^{(0)}(t - \vartheta), & \text{якщо } t > \vartheta, \end{cases} \\ \dot{r}_j(t) &= a_{2j} m_j^{(\vartheta)}(t) - b_{2j} r_j(t),\end{aligned}\tag{6.2}$$

де $m_j^{(0)} = m_j^{(0)}(t)$ - концентрація молекул пре-мРНК, що містять j -цистрон; $m_j^{(v)} = m_j^{(v)}(t)$ - концентрація «зрілих» молекул j -х фракцій мРНК, зв'язаних з рибосомами (клітинними молекулярними структурами, що синтезують білки); параметр ϑ - проміжок часу, необхідний для процесінгу, транспорту і трансляції j -ї фракції мРНК. Сенс решти позначень - такий же як для рівнянь (1).

Розглянемо можливість створення моделі системи керування процесом побудови запам'ятовуючих структур з урахуванням використання функціональної інформації в генних мережах.

У молекулярних системах кодуєчих полімерів і метаболітів завжди можна виокремити керуючі підсистеми, в яких протікають сигнальні процеси, що керують біохімічними процесами виробництва молекулярних компонентів системи. Серед цих керуючих підсистем особливий інтерес представляють системи керування процесом побудови молекулярних запам'ятовуючих структур (МЗС).

Мовою теорії автоматів була побудована в загальному вигляді модель системи керування онтогенезом (розвитком біосистем)[6.11], яка може використовуватися і для моделі побудови молекулярних запам'ятовуючих структур. Вибір математичного апарату в такій моделі обґрунтовується тим, що досліджувані нами процеси керування по суті своїй дискретні, а автомати моделюють пристрої переробки інформації.

В [6.11] було показано, що, якщо в множині Ω станів пам'яті Ξ автомата A^{ont} існує в крайньому випадку два різних зворотних стани ω_a і ω_β , а серед всіляких вхідних послідовностей є така послідовність $\tilde{\xi}$, що додавання її до A^{ont} / ω_a або до A^{ont} / ω_β приведе до станів ω_a і ω_β відповідно, то ці стани наслідуються, тобто стан $\omega(t_v^{k+1})$ пам'яті Ξ автомата A^{ont} залежить від стану пам'яті $\omega(t_\zeta^{k=1})$, де k - відповідає номеру клітинного покоління. Також було показано, що якщо нетривіальний неавтономний автомат A_ζ^{ont} містить принаймні одну елементарну комірку пам'яті, яка має два стани, які взаємно однозначно відповідають двом альтернативним підпрограмам онтогенезу, то ці стани успадковані.

При інтерпретації результатів математичного моделювання систем керування онтогенезом слід мати на увазі, що автомати A^{ont} (вони ж моделі МЗС) чисто функціональні конструкції, оскільки їх внутрішня структура не розглядається: в цих автоматах стану функціональної пам'яті всього лише "внутрішні змінні", що дозволяють пов'язувати вихідні змінні автомата зі вхідними, тобто немає "прив'язки" до реальних структур генних систем. Внаслідок цього функції переходів (Φ) і виходів (Ψ) можуть бути однаковими для абсолютно по-різному влаштованих молекулярних механізмів, які їх реалізують. Тому в цьому сенсі можна говорити про функціональну еквівалентність як систем керування онтогенезом, модельованих одним класом автоматів, так і молекулярних механізмів, що реалізують функціональну пам'ять МЗС, зокрема функціональну спадкову пам'ять.

Таким чином, функціональна пам'ять може бути представлена як безліч функціонально еквівалентних молекулярних механізмів, що забезпечують кодування, зберігання та передачу в ряду генерацій функціональної спадкової інформації.

Тут важливо визначити, що є матеріальним втіленням осередків функціональної спадкової пам'яті. Свого часу була запропонована гіпотеза про існування особливого класу спадкових одиниць, в якій частина спадкової інформації зберігається, кодується і передається потомству поза молекулами ДНК генома. Тоді в якості моделей таких одиниць були розглянуті лише циклічні системи генів (ЦГС). Але, якщо не обмежуватися тільки ЦГС, то такими одиницями можна називати кожен систему генів, що має не менше двох стійких режимів функціонування підпорядкованих їй генів і здатна зберігати кожен з режимів в послідовному ряду генерацій. До теперішнього часу накопичилася велика кількість фактів, що свідчать на користь цієї гіпотези. Оскільки, згідно з визначенням, ЦГС здатні зберігати функціональні стани в ході побудови запам'ятовуючих структур і забезпечувати передачу кодованої цими станами функціональної інформації, природно вважати, що молекулярно-генетичною реалізацією осередків функціональної спадкової пам'яті є ЦГС.

Таким чином, ЦГС будуються з генів і їх частин як системи наступного рангу складності з прогнозованими заданими керованими успадкованими режимами функціонування генів, що входять до них.

Вже згадана система є елементарною, тобто може кодувати, зберігати і передавати клітинному потомству викликані зовнішніми специфічними сигналами зміни функціонального стану без зміни ДНК-послідовностей, що входять в систему генів.

Використовуючи властивість структурної стійкості для моделей керуючих генних мереж можна реалізувати модель конструювання з генетичних блоків внутрішньонейронного молекулярного комп'ютера. Наведемо також приклад молекулярно-генетичної конструкції, яка реалізує штрих Шеффера (рис.6.2).

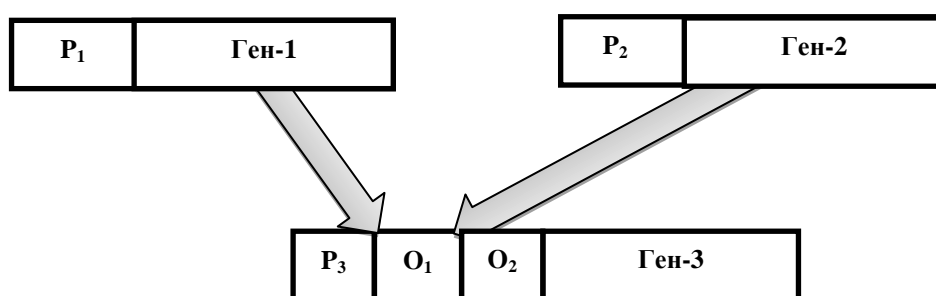


Рис.6.2. Модуль з трьох генів, який реалізує функцію Шеффера:

p_1, p_2, p_3 -промоторні ділянки відповідних генів; o_1, o_2 - операторні ділянки гена 3, специфічні до білкових корепресорів. Оператор - ділянка ДНК, яка зв'язана з регуляторним білком).

Використання циклічних генних мереж (ЦГМ) можливо у вигляді осередку пам'яті, здатного «запам'ятовувати» виконавчі сигнали, подібно елементарним осередкам запам'ятовуючих пристроїв електронних комп'ютерів. Слід зауважити, що розглянутий осередок має субмолекулярні розміри об'ємом до 1 мк^3 . Ясно, що можна послідовно «нарощувати» такі прості моделі генних мереж з тим, щоб вони реалізовували все більш складні функції.

Такі генні мережі, очевидно використовуються в системах природного інтелекту при створенні молекулярних запам'ятовуючих структур. У генній терапії для адресного включення компенсаторних генів в потрібний момент при лікуванні спадкових захворювань також можуть знайти застосування зазначені моделі реалізації ЦГМ.

Активність гена 3 описується виразом (6.3):

$$\gamma = \bar{\lambda}_1 \vee \bar{\lambda}_2, \quad (6.3)$$

де бінарна змінна γ позначає активність гена, якщо $\gamma = 1$, то ген активний, якщо $\gamma = 0$, то неактивний. Гени 1 і 2 виробляють білкові корепрессора для гена 3.

Таким чином, вдалося показати, що, маніпулюючи генами і їх частинами, молекулярні пристрої клітини нейрона здатні реалізувати логічні і арифметичні операції, а так само осередки пам'яті, тобто молекулярні мікросхеми. Оскільки ДНК-носії цих мікросхем автоматично відтворюються універсальними клітинними пристроями редуплікації (синтезу), то сконструйований молекулярний внутрішньонейронний чіп здатний тиражуватися, причому і, як показано вище, функціональні стани елементів пам'яті будуть зберігатися. Використовуючи зазначений вище алгоритм процесу побудови молекулярних запам'ятовуючих структур, можна в перспективі конструювати молекулярні комп'ютери.

Нейронні і синаптичні мережі мають властивість стійкості в широкому сенсі, що забезпечує протікання процесу побудови молекулярних запам'ятовуючих структур. При запам'ятовуванні включається сукупність внутрішньосистемних процесів, що призводять до включення структур, що забезпечують стійкість до зовнішніх впливів і до внутрішніх флуктуацій. Так, стійкість процесу запам'ятовування забезпечується шляхом реалізації властивостей ЦГМ.

Роботу нейронних і синаптичних мереж можна уявити як основу при створенні молекулярних запам'ятовуючих структур шляхом реалізації властивостей високостійкого стану речовини у вигляді ЦГМ, що використовують для підтримки процесів запам'ятовування інформацію, кодовану станами окремих молекул. Різні структурні стани генів - це різні молекулярні слова кінцевої довжини, в яких інформація кодується структурним способом. При створенні молекулярних запам'ятовуючих структур використовуються внутрішні реакції речовини на зовнішні впливи, спрямовані на збереження свого стану, а також використовується інформація, яка кодується функціональними станами молекулярної системи кодуючих полімерів та інших компонентів нейрона.

6.3. Модель кодування сигналів в молекулярній структурі нейрона.

Проводячи дослідження в області молекулярних комп'ютерів, необхідно дати визначення поняттю «молекулярна інформація». Для зазначеного визначення будемо виходити від наявності систем передачі повідомлень на молекулярному рівні і відповідних систем кодування.

Розглянемо модель кодування сигналів в молекулярній субнаносистемі нейрона. Процес кодування має на увазі наявність передавального і приймаючого суб'єктів, які повинні узгодити який код має кожне повідомлення. При такому підході суб'єкти здатні в будь-якому порядку розставляти макроскопічні об'єкти в просторі і часі на свій розсуд. Це саме можна сказати і до розташування в часі нервових імпульсів.

Визначимо основні уявлення з моделювання процесів кодування в нейроні. Можна прийняти, що процеси створення кодів в нейроні здійснює молекулярний квантовий регулятор (МКР) шляхом розподілу нервових імпульсів у часі, керуючи відповідно зі своїми рішеннями вихідними каналами мембрани нейрона [6.10]. Але необхідно відзначити, що в макросвіті можливість кодування за заданим рішенням може здійснюватись у вигляді перестановки об'єктів, значків або імпульсів. Усередині МКР такої можливості немає. Там елементарні квазічастинки можуть народжуватися і зникати незалежно від зовнішнього спостерігача. Тому, поняття інформації відноситься обов'язково до макроскопічних предметів і сигналів.

Таким чином, стає зрозумілим, що поняття «молекулярна інформація» має нести свої ознаки, що впливають з особливості роботи наносубсистем, якими є молекулярні комплекси клітин. Поняття «кількість інформації» - чисто математичне. Фізика ж передбачає, що майбутні системи залежить аж ніяк від наших бажань, а тільки від минулого стану системи.

У фізиці було багато спроб пов'язати поняття інформації з термодинамічними характеристиками. Безліч робіт з цього приводу, зроблених до і після Бріллюена, не можуть задовольнити дослідників молекулярних систем. Справа в тому, що схожість в формулах, що описують кількість інформації і ентропію, чисто зовнішня [6.4].

Поняття «кількість інформації» визначає довжину коду. А оскільки в коді можуть використовуватися всілякі перестановки, то, при передачі N повідомлень, ми можемо отримати довжину коду (4.4):

$$L = \log_a N, \quad (6.4)$$

де a - кількість різних символів, які використовуються при кодуванні. Так що поява \lg у формулі, яка визначає кількість інформації не випадкова [5.12].

Повідомлення, яке передається часто, згідно з основним положенням теорії інформації, треба кодувати коротко, а те, що рідко - довго. Тоді в середньому лінія буде завантажена менше. Звідси знаменита формула кількості інформації, схожа на формулу для ентропії. У термодинаміці ж імовірністність стану фізичної системи має зовсім інший сенс. Цей стан великої кількості частинок, рух яких підпорядковується законам фізики. Теорія інформації і теорія кодування складні з точки зору фізичної реалізації, оскільки ці науки засновані на ідеях математики. Можна створити будь-який код, можна розташувати в будь-якому порядку букви тексту, тобто можна довільно переміщати в просторі або в часі макроскопічні предмети в повному протиріччі з тим, що стверджує фізика [6.4].

Це протиріччя вдається вирішити, тільки описавши живі системи як квантові молекулярні регулятори, здатні виробляти кодування за своїми програмами.

Виникає питання, чи можна вказати, в яких завданнях, розв'язуваних молекулярним комп'ютером живої клітини, є істотним вплив обчислення на завдання. Ясно, що такого впливу немає для задач поведінки організму, що вирішуються нервовими клітинами. Вплив обчислення істотно для внутрішніх завдань живих клітин. До цих пір його не вдалося продемонструвати експериментом саме через те, що природа влаштована за принципом мінімального впливу вимірювання та обчислення. Вплив вимірювання також виявили порівняно недавно через малу величину постійної Планка [6.3].

Таким чином, зазначені вище дослідження дали можливість підійти до вирішення проблеми обробки інформації молекули клітини, тобто до «молекулярному комп'ютингу» [6.4]. «Комп'ютер», присутній всередині нейрона, отримує інформа-

цію, коли певні хімічні речовини поступають на зовнішню клітинну мембрану. В результаті цього клітинний комп'ютер «обчислює», як відреагувати на цей сигнал, і робить запит в ядро нейрона. Там включається одна ієрархія програм, що веде до створення іншої групи програм поведінки синаптичних структур нейрона шляхом розрізання та повторного склеювання частин ДНК ядра за конкретними програмами, які перебувають в тій же ДНК. Іншими словами, діє точно так же, як і звичайний комп'ютер, тобто на основі інструкцій (команд) і їх виконання.

Коли процес розрізання і склеювання завершується, клітина синтезує білок, який ініціює подальшу реакцію. Описана дія зараз широко відома, і на цьому принципі заснована, по суті, генетична інженерія.

Останні досягнення на стику фізики, кібернетики і біології дозволяють говорити про те, що клітина містить в собі фізичну інформацію про саму людину і законах його розвитку в навколишньому світі [6.12]. У момент народження людини в його генетичному коді записані закони, відповідно до яких функціонує процес розвитку людини в реальному світі. Стає більш зрозумілим механізм кодування в молекулі ДНК законів реального світу і дій людини у відповідності з інформацією, яка є всередині її самої.

При розгляді роботи мозку людини звертає увагу явище, при якому клітини людського мозку діють на зразок гігантської телефонної станції, що працює за принципом аналогового комп'ютера (рис.6.3). У будь-якій клітині певна інформація починає «працювати», коли отримує ззовні необхідні дані. Білки, створені в клітині, реагують відповідно до їх специфічної будови.

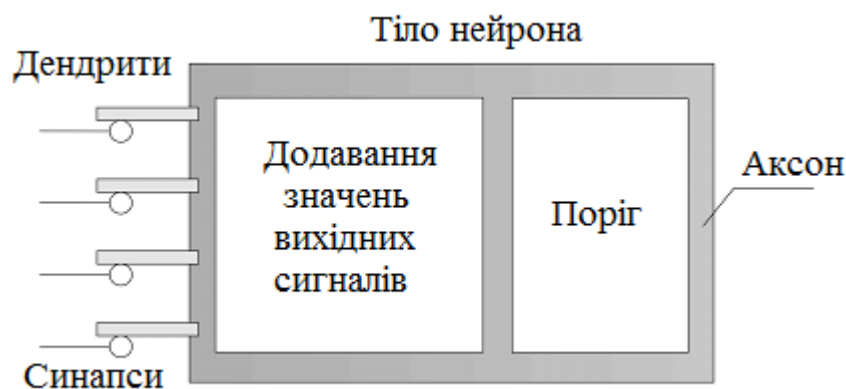


Рис.6.3. Функціональна схема роботи молекулярного комп'ютера нейрона.

Особливістю описуваної теорії є те, що спосіб роботи подібного «комп'ютера» неможливо точно проаналізувати. Не може цього зробити ні звичайна, ні квантова фізика. Причина в тому, що в момент, коли ми намагаємося «перевірити» або «виміряти» його стан, ми надаємо на нього вплив і тим самим змінюємо його роботу.

«Самовідтворення», що розуміється таким чином, може бути пов'язане з процесами самоускладнення і саморозвитку. Дійсно, якщо самовідтворення можливо лише на певному критичному рівні складності, то система, яка вирішує завдання відтворення собі подібних, повинна бути "запрограмована" на самоускладнення і, отже, на саморозвиток. З огляду на поняття складності і правильної організації як своєрідної суми програмних засобів для створення об'єктів, подібних вихідному об'єкту, можна говорити про модельну реалізацію поняття «самоорганізації» (рис.6.4).

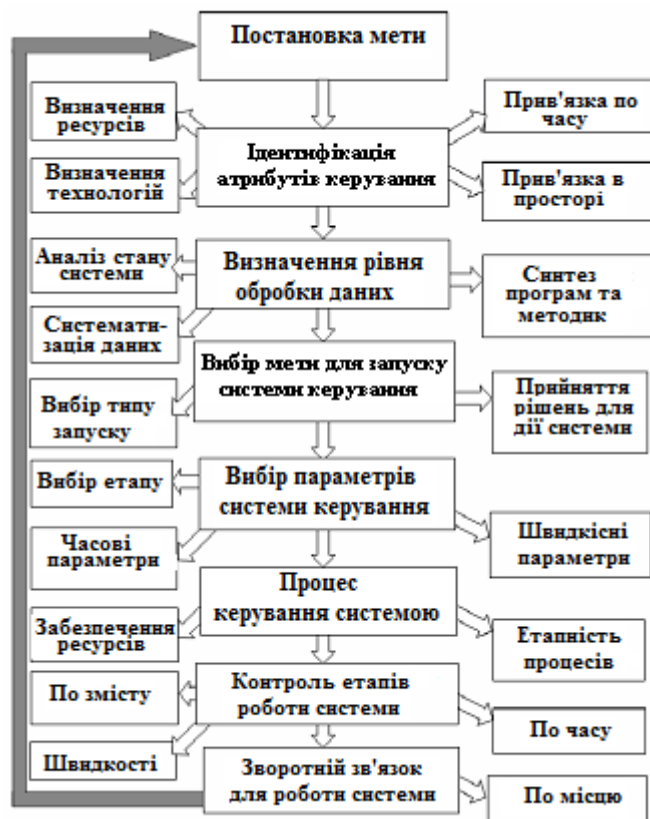


Рис.6.4. Етапи алгоритму керування складною системою у вигляді вкладених підпрограм.

Розглянемо поняття «самовідтворення» і «самоорганізації» в контексті характеристики автоматів, що дають на виході щось схоже на них самих. Дуже важливим в процесі самовідтворення є вирішальна роль складності, що виявляється в тому, що

для кожного автомата є критичне число елементарних частин, нижче якого процес синтезування вироджується, а вище (за умови правильної організації) набуває характеру вибуху.

Тому правомірне питання, поставлене в загальній і динамічній формі, "як може щось, що здається простим, самотійно стати складним" [6.13]. Цей підхід показує, що моделі відтворення, запропоновані Дж. фон Нейманом, містять сильні обмеження, які знімаються в процесах відтворення природних автоматів, реалізованих природою в живих організмах за умови наявності програмних засобів в ядрі клітини і принципів керування, наведених на рис.6.4.

В [6.14] питання відтворення систем відображаються таким чином: "У моделях фон Неймана нова машина хоча й будується поступово, крок за кроком, а не створюється готовою в один момент, все ж це зростання керується повністю ззовні тією машиною, яка її будує. Тобто одна машина будує іншу машину, а не друга машина будується сама на основі інструкцій, даних їй першою машиною.

Звичайно, цікаво, що живі істоти самовідтворюються не по способу фон Неймана, а розвиваються автономно з чогось більш простого, ніж їх «батьки» [6.14].

6.4. Інформаційні моделі молекулярних механізмів роботи синапсів.

Розглянемо особливості молекулярних механізмів роботи синаптичних структур, необхідних для формування довготривалої пам'яті. Нижче приведена ієрархія масштабів організації, від молекул нейромедіаторів до головного і спинного мозку. На схемі видно місце синапсів (рис.6.5). Основною ланкою при формуванні синаптичних структур є перетворення в синтезі білка, які призводять до змін форми і функції синапсу. Фосфорилування білка в синапсі грає важливу роль у формуванні короткотривалої пам'яті. При збудженні обох нейронів даного синапсу починають відбуватися зміни в його синаптичній щілині, які мають відношення до короткотривалої пам'яті і впливають на проходження сигналу через синапс [5.31].

Якщо образ в пам'яті підтримується за допомогою позитивних зворотних зв'язків самозбудження, то зміни в самому синапсі можуть розірвати зв'язок і погасити цей образ.

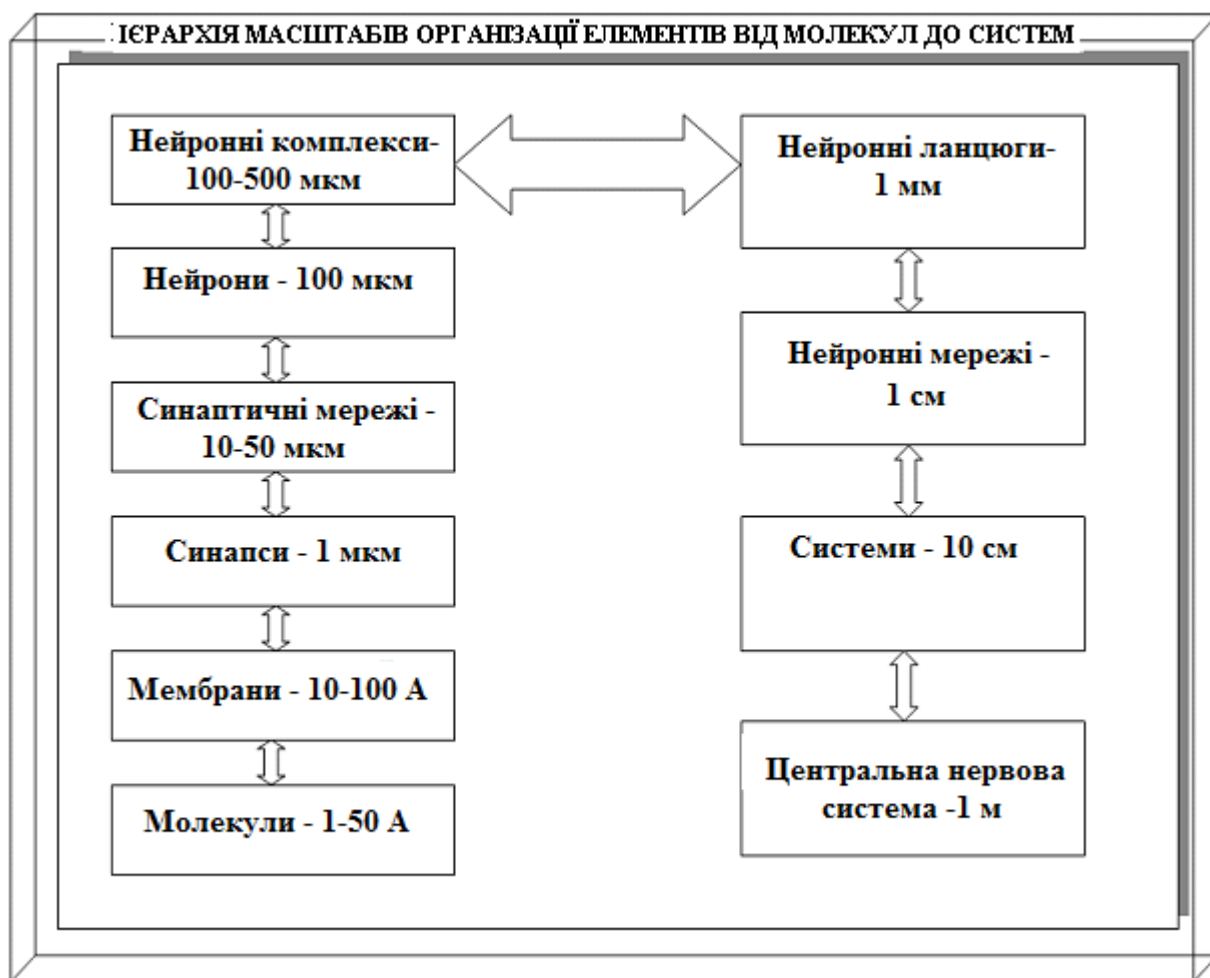


Рис. 6.5. Ієрархія масштабів організації, від молекул нейромедіаторів до головного і спинного мозку.

Можна сказати, що пам'ять людини «локалізується в синапсах» і зміни функції синапсу є основними в процесі формування різних типів пам'яті, зокрема за участю нейронних мереж.

Для уявлення мозку як єдиної нейронної мережевої структури пам'яті розглянемо модель роботи нейронного квантового обчислювача, заснованого на механізмі об'єктивної редукції. При моделюванні вказаного квантового нейронного обчислювача будемо досліджувати перемикання між конформаціями тубулінів, які здатні вмикати механізм суб'єктивних відчуттів мозку в рамках феномену свідомості.

В [6.15] стверджується, що розуміння мозку як молекулярно-хімічної машини не дає нам можливості зрозуміти найголовнішого - яким чином виникають суб'єктивні

відчуття. Суб'єктивні відчуття не витікають з молекулярно-хімічного коду, а виникають, як щось додаткове до нього.

Фахівці з нейронауки пройшли шлях від розгляду функцій відділів мозку, через дослідження молекулярно-хімічної машини нейронних мереж і прийшли до необхідності досліджень на рівні наноструктур нервових клітин. Використовуючи метод фарбування нервових тканин солями срібла було знайдено, що мозок являє собою сукупність окремих нейронів, а не єдину мережу нервових волокон [6.16].

Нервова тканина складається з окремих нейронів. Кожна нервова клітина має важливу внутрішню структуру - цитоскелет, що складається з мікротрубочок. Мікротрубочки представляють собою порожнисті трубки, що складаються з білкових молекул - тубулінів. Кожен тубулін представляє дві порожні кульки і містить близько 440 амінокислот. Тубулін може існувати в двох просторових конфігураціях - конформаціях α і β . Перемикання між конформаціями здійснюється шляхом переходу всього лише одного електрона, і займає час близько 10^{-9} с. Гіпотеза [6.17] полягає в тому, що, по-перше, нервова клітина сама по собі - це дуже складна система обробки інформації, по-друге, цитоскелет клітини - це і є обчислювальна система клітини, і, по-третє, елементарними операціями в цій системі є квантові зачеплення станів окремих молекул-тубулінів і редукція цих станів - перемикання між конкретними конформаціями.

Тубулін має розмір 8 нм, тому процеси обробки інформації в цитоскелеті клітини, які керуються конформаційними перемиканнями, є ключовими для сучасної нанотехнології. Створення додаткових моделей в цій області вкрай необхідно.

З гіпотези [6.17] випливає те, що клітина - це квантовий комп'ютер. У роботі [6.17] пропонується схема квантового обчислювача, заснованого на механізмі об'єктивної редукції і перемиканнях між конформаціями тубулінів.

Є необхідною розробка концепції самоорганізації на квантовомеханічному рівні, із залученням моделей квантової механіки. Надзвичайно цікаво побудувати моделі сценарію об'єктивної квантової редукції в мікроструктурах клітини. Подальший розвиток нанотехнології неможливий без розуміння процесів обробки інформації в

клітині, побудови моделей цих процесів, розуміння того, як ці процеси можуть бути використані для складання наноконструкцій.

Для різних маніпуляцій над ДНК-молекулами використовуються різні ензими (ферменти). І точно так само, як сучасні мікропроцесори мають набір базових операцій типу додавання, зсуву, логічних операцій AND, OR і NOT NOR, ДНК-молекули під впливом ензимів можуть виконувати такі базові операції, як розрізування, копіювання, вставка і ін. Причому всі операції над ДНК-молекулами можна виконувати паралельно і незалежно від інших операцій, наприклад доповнення ланцюжка ДНК здійснюється при впливі на вихідну молекулу ферментів-полімераз.

У живій клітині міститься гігантський молекулярний текст і написаний він молекулярними буквами - нуклеотидами. У ньому набагато більше букв, ніж у всіх текстах, написаних усіма людьми за весь час існування людства.

Як відомо, на ДНК прямого коду амінокислотної послідовності часто немає. Він виникає в клітині в результаті складної переробки ДНК і РНК. У людини відношення до текстів білків має тільки 10% ДНК.

Для розуміння роботи ДНК необхідно знати зміст записів на ній. Можна вважати, що це записи молекулярних програм для молекулярної обчислювальної машини (МОМ). У програмах закодовані не амінокислоти, а білки, що перетворюють молекулярний текст.

Ідея про МОМ вперше описана в [6.12]. У цій роботі обґрунтовувалися принципи роботи пристроїв типу універсальної обчислювальної машини, здатних вирішувати складні завдання, керованої програмою, записаною на молекулах ДНК і РНК, яка надходить ззовні. Рішення таких завдань вимагає можливості виробляти перетворення не тільки зовнішньої інформації, але і самої програми. Наводилися аргументи про те, що клітинна мембрана містить такий «комп'ютер», причому в якості «тригерів» працюють ланцюжки, які переносять через мембрану електрони, АТФази (АТФ - аденозинтрифосфорна кислота), що є протонними або іонними помпами, і керовані іонні канали »[6.18] .

Якщо скористатися елементарними знаннями про ЕОМ, в клітині легко виявити всі необхідні елементи для молекулярної обчислювальної машини. По-перше, є молекулярна пам'ять, причому як довготривала (на молекулах ДНК), так і оперативна (синтезовані всередині клітини молекули РНК). Молекулярним текстом на ДНК і РНК записані також і програми для МОМ.

Тексти таких програм написані на молекулярній мові, що має алфавіт з чотирьох букв (А - аденін, Г - гуанін, Ц - цитозин, Т - тимін, в РНК замість тиміну У - урацил). З цих букв молекул-мономерів складаються різноманітні послідовності.

Розглянемо можливості інструментарію клітини з розміщення молекул-слів за адресами. Адреси можна написати на самому молекулярному слові. Причому аналогія підказує, що написати адресу можна в тому ж алфавіті. Молекулярні адреси, що є частиною молекулярних слів і перетворюють ці слова молекулярних операторів, - одне з найголовніших відмінних властивостей МОМ [6.12].

Існує природний спосіб читати молекулярні адреси. Цей спосіб описаний в [5.32], коли було відкрито будову подвійної спіралі ДНК. Букви молекулярного алфавіту здатні утворювати між собою не тільки міцні (ковалентні) зв'язки, але і більш слабкі (засновані на водневих зв'язках і ще більш слабких взаємодіях). Слабкі зв'язки утримують молекули разом, тільки якщо цих зв'язків багато. Вони можуть забезпечити прилипання до даної молекулі іншої молекули, якщо остання має відповідну високоспецифічну структуру (здатністю утворювати слабкі зв'язки в потрібних місцях). Це здійснюється за комплементарним зв'язуванням в молекулах ДНК і РНК. Нуклеотид А взаємодіє з нуклеотидом Т (або У), Г - з Ц.

Таким чином, якщо є ланцюжок молекулярних букв, які складають слово адреси, то лише слово, що складається з комплементарних букв, дізнається про цю адресу і прилипне до нього. Слово прилипне міцно, бо з багатьох слабких зв'язків утвориться сильна. Взаємодія комплементарних ділянок - це фізична взаємодія. Функціональні блоки молекулярної машини нейрона з відповідними процесами наведені на рис.6.6. Після того як комплементарні поверхні молекули-слова і молекулярного оператора з'єдналися - адреса знайдена. І молекулярний оператор виробляє ферментативне перетворення молекулярного слова в заданому місці. Оператори, що перетворюють

слова в МОМ, не схожі на схеми, що здійснюють перетворення в ЕОМ. Це головним чином білкові молекули-ферменти. Деталі МОМ - квантові об'єкти [6.12].

В [6.12] було висловлено низку принципів про значення і роботу молекулярних текстів в МОМ живих клітин. На модельному рівні складається картина, що еволюція направляється за допомогою заздалегідь запланованого вироблення відповідних серій вірусів. Однак таке твердження необхідно ретельно аргументувати і експериментально перевірити.

Велика частина ферментів, що оперують в клітині з молекулами-словами ДНК і РНК, працює тільки з молекулами, що мають певну адресу, записану на самих молекулах-словах.

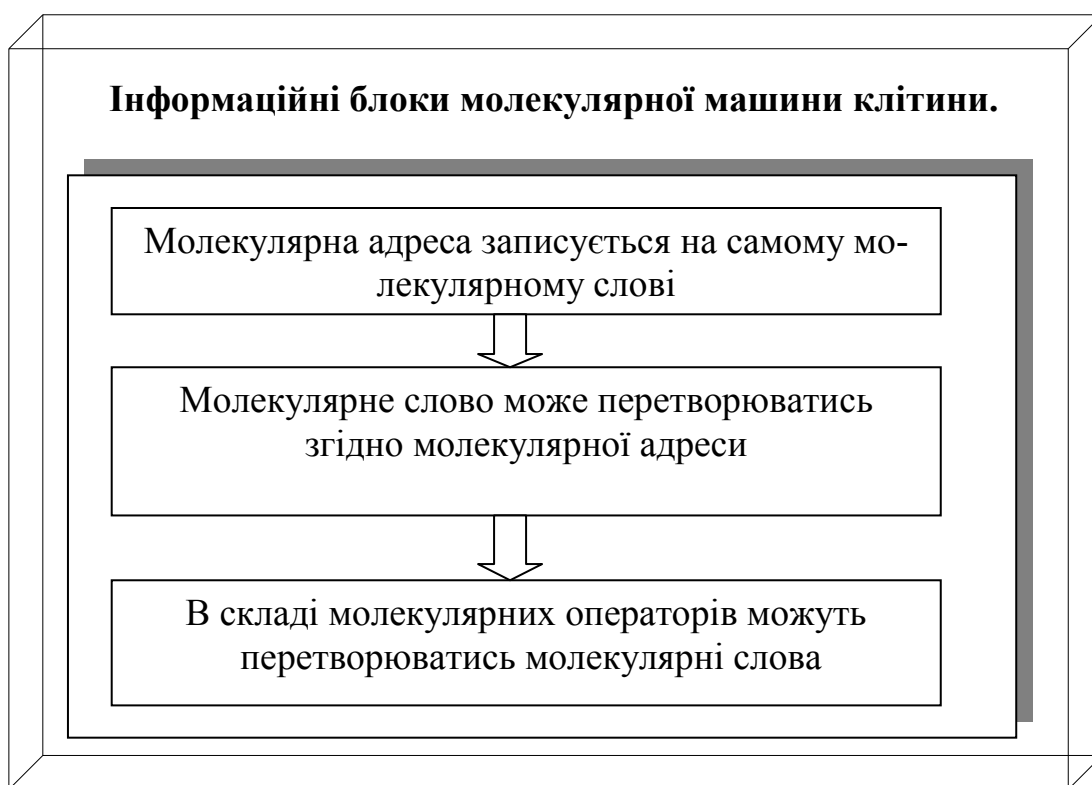


Рис.6.6. Функціональні блоки молекулярної машини нейрона з відповідними процесами.

Молекулярні обчислювальні машини нейронів беруть участь в роботі мозку. Мозок організований з «мислячих істот», які обмінюються сигналами (нервові імпульси) і книгами (молекули-слова). Свідомість локалізована в даний час в одній нервовій

клітині або в клітинах, пов'язаних «тісним контактом», в якому дозволено обмін молекулами-словами.

Для пояснення феномена людини важливо зрозуміти яким чином нейрони здатні перетворювати слова звичайної мови людей в слова-молекули РНК і ДНК. Почнемо з того, що слова розмовної мови універсально кодуються. Відповідні молекули дуже схожі у людей, які розмовляють однією мовою, і сильно відрізняються у тих, які розмовляють різними мовами»[6.12].

Кілька десятиліть тому нейрон представлявся порівняно простим пристроєм, здатним перебувати в стані збудження або спокою. Однак дослідження останніх років показали, що сам нейрон є складною системою. Не елементом величезної машини, а міні-машиною, укладеною в макро-машину - мозок, і пов'язаною з мільярдами подібних мікромашин за допомогою безлічі зв'язків (рис.6.7).



Рис.6.7. Функції біонейрона в молекулярній машині клітини.

Отже, «комп'ютер», присутній всередині клітини, отримує інформацію, коли певні хімічні речовини надходять на зовнішню клітинну мембрану. В результаті

цього клітинний комп'ютер «обчислює», як відреагувати на цей сигнал, і робить це шляхом розрізання та повторного склеювання частин ДНК, що знаходяться в ядрі. Іншими словами, діє точно так же, як і звичайний комп'ютер, тобто на основі інструкцій (команд) і їх виконання.

МОН окремих нейронів, пов'язані нейронною мережею, утворюють єдину велику систему обчислювальних машин. На цю систему з її величезною спільною пам'яттю, з колосальними можливостями переробки інформації і спираються здатності нашого мозку (в тому числі мислення) (рис.6.7).

В останні роки з гіпотезою нейронної пам'яті стала конкурувати гіпотеза про пам'ять молекулярну [6.12]. Не окрема клітина - нейрон, а білкові або ліпідні молекули можуть бути тими буквами, якими мозок кодує інформацію. Як зазначалося вище, в кожній клітині є своя МОН, яка переробляє інформацію і для власних потреб і для всього організму.

Принципи роботи розглянутої молекулярної електронно-іонної обчислювальної машини живої клітини можна використовувати для подальшого розвитку побудови архітектури штучних нейронів і створення нового класу обчислювальних пристроїв.

На основі проведеного дослідження було виявлено:

1. Кожен нейрон можна вважати своєрідним процесором: він підсумовує з відповідними вагами сигнали, що приходять від інших нейронів, виконує нелінійну (наприклад, порогову) вирішальну функцію і передає результуюче значення пов'язаним з ним нейронам.

2. Модель формального нейрона не є біоподібною і швидше схожа на біологічну абстракцію, ніж на живий нейрон.

3. Біологічний нейрон - це дуже активна динамічна система, що володіє безліччю різноманітних властивостей, які з успіхом можуть бути використані при розвитку моделей штучного нейрона і штучних нейронних мереж (ШНМ). \

4. Біологічний нейрон є елементарним процесором складної мультипроцесорної системи-мозку людини, і пов'язаний з мільярдами подібних же процесорів.

5. Навчання ШНМ може здійснюватися шляхом зміни вагових коефіцієнтів і зміщення. Існують різноманітні процедури для підбору ваг, завдяки яким можна зробити мережу, здатну обчислити майже будь-яку функцію (тобто будь-яке перетворення між векторами).

Фактично в мережі можна реалізувати функцію, яку навіть не можна сформулювати, досить лише дати їй набір прикладів, які показують, які входи і виходи ми хотіли б мати. Цей процес, що називається «навчанням мережі», здійснюється шляхом послідовного підбору ваг для зв'язків, що привласнюються. Такий процес триває до тих пір, поки мережа не почне виконувати бажані перетворення з входом, щоб отримати потрібний вихід. Хоча ця модель мережі надзвичайно спрощує структуру мозку, вона все ж ілюструє кілька важливих аспектів. На рис.6.8 представлена схема особливостей паралельної обробки інформації в синаптичних мережах.



Рис.6.8. Схема особливостей паралельної обробки інформації в синаптичних мережах.

По-перше, паралельна архітектура забезпечує колосальну перевагу в швидкодії в порівнянні з традиційним комп'ютером, оскільки численні синапси на кожному рівні виконують безліч дрібних обчислювальних операцій одночасно, замість того щоб діяти в дуже трудомісткому послідовному режимі.

Ця перевага стає все більш значною, у міру того як зростає кількість нейронів на кожному рівні. Вражає, що швидкість обробки інформації, абсолютно не залежить ні від числа елементів, що беруть участь в процесі на кожному рівні, ні від складності функції, яку вони обчислюють. Кожен рівень може мати чотири елементи або сотню мільйонів; конфігурація синаптичних ваг може обчислювати прості однорозрядні суми або вирішувати диференціальні рівняння другого порядку. Це не має значення. Час обчислень буде одним і тим же.

По-друге, паралельний характер системи робить її нечутливою до дрібних помилок і надає їй функціональну стійкість; втрата кількох зв'язків, навіть помітної їх кількості, надає такий малий вплив на загальний хід перетворення, що його можна знехтувати, оскільки завдання виконується частиною мережі, яка залишилась.

По-третє, паралельна система запам'ятовує велику кількість інформації в розподіленому вигляді, при цьому забезпечується доступ до будь-якого фрагменту цієї інформації за час, що вимірюється кількома мілісекундами. Інформація зберігається у вигляді певних конфігурацій ваг окремих синаптичних зв'язків, що сформувалися в процесі попереднього навчання. Потрібна інформація «вивільняється» у міру того, як вхідний вектор проходить (і перетворюється) через цю конфігурацію зв'язків.

Паралельна обробка даних не є ідеальним засобом для всіх видів обчислень. При вирішенні завдань з невеликим вхідним вектором, але таких, що вимагають багатьох мільйонів швидко повторюваних рекурсивних обчислень, мозок виявляється абсолютно безпорадним, в той час як класичні МС-машини демонструють свої найкращі можливості. Це дуже великий і важливий клас обчислень, так що класичні машини будуть завжди потрібні і навіть необхідні. Однак існує не менше широкий клас обчислень, для яких архітектура мозку являє собою найкраще технічне рішення.

Це головним чином ті обчислення, з якими зазвичай стикаються живі організми: розпізнавання контурів хижака в «зашумленому» середовищі; миттєве згадування правильної реакції на його пильний погляд, спосіб втечі при його наближенні або захисту при його нападі; проведення відмінностей між їстівними і неїстівними речами. Нарешті, дуже важливо помітити, що описана паралельна система не маніпулює символами відповідно до структурних правил. Швидше маніпулювання символами є лише одним з багатьох інших «інтелектуальних» навичок, яким мережа може навчитися або не навчитись.

6.5. Визначення головного завдання біохімічної машини нейрона по обробці інформації в синаптичних структурах.

Для виокремлення головного завдання біохімічної машини нейрона на рівні виконання завдання і запам'ятовування необхідно використовувати постулат:

Утворення навички у вигляді синапсу, відповідального за формування сліду пам'яті, забезпечується шляхом перебудови і посилення даного синапсу в результаті про- процесу, що вимагає активації генів.

Для визначення функцій молекулярної пам'яті розглянемо її місце при формуванні довготривалої і короткочасної пам'яті. На рис. 6.9 представлені будова і робота збудженого синапсу аксона нейрона.

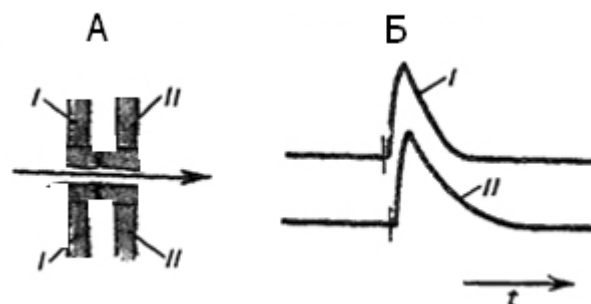


Рис.6.9. Будова і робота збудженого синапсу аксона нейрона.

А - ділянка близького знаходження пре- (I) і постсинаптичної (II) мембран з поперечним каналом, що забезпечує протікання іонного струму; Б- співвідношення в часі (t) пре- (I) і постсинаптичного (II) потенціалу дії.

Як відомо [5.32] довготривала і короткочасна пам'ять зберігаються в синапсах - місцях контакту між нейронами, де відросток нейрона, який передає сигнал (аксон), зустрічається з одним з десятків виростів сусіднього нейрона, що приймають сигнал і називаються дендритами.

Нейрон, як і всі інші клітини, оточений напівпроникною мембраною. Від тіла нейрона відходять два типи відростків - дендрити і аксони. У більшості нейронів багато розгалужених дендритів, але лише один аксон. Дендрити зазвичай дуже короткі, тоді як довжина аксона коливається від декількох сантиметрів до декількох метрів. Тіло нейрона містить ядро і інші органели, такі ж, як і в інших клітинах тіла.

При навчанні та запам'ятовуванні відбуваються процеси, які ініціюються сигнальними молекулами, що запускають безперервні каскади біохімічних реакцій для стимуляції або гальмування активності нейронів. Серед сигнальних молекул - "молекул пам'яті" відомі γ -аміномасляна кислота (ГАМК), дофамін, ацетилхолін та ін. Під час навчання відбуваються молекулярні зміни в синапсах - просторі на стику двох нейронів.

Розглянемо процеси нанесення інформації на поверхню синапсу із використанням ферменту кінази, подібно до того як цифрова інформація наноситься на поверхню компакт-диска [5.31].

Передача інформації в мозку, як і нервовій системі в цілому, здійснюється за допомогою нервових імпульсів. Нервовий імпульс зазвичай зароджується в дендритах - тонких розгалужених відростках нейрона, що спеціалізуються на отриманні інформації від інших нейронів і передачу її тілу нейрона. На дендритах і, в меншій кількості, на тілі клітини є тисячі синапсів; саме через синапси аксон, що несе інформацію від тіла нейрона, передає її дендритам інших нейронів.

Вони поширюються в напрямку від тіла клітини до кінцевого відділу аксона, який може гілкуватися, утворюючи безліч закінчень, що контактують з іншими ней-

ронами через вузьку щілину - синапс; передача імпульсів через синапс опосередкована хімічними речовинами - нейромедіаторами.

У закінченні аксона, яке утворює пресинаптичну частину синапсу, містяться маленькі бульбашки з нейромедіатором. Коли імпульс досягає пресинаптичної мембрани, нейромедіатор із пляшечки вивільняється в синаптичну щілину. Закінчення аксона містить тільки один тип нейромедіатора, часто в поєднанні з одним або декількома типами нейромодуляторів.

Нейромедіатор, що виділився з пресинаптичної мембрани аксона, зв'язується з рецепторами на дендритах постсинаптичного нейрона. Мозок використовує різноманітні нейромедіатори, кожен з яких зв'язується зі своїм особливим рецептором. З рецепторами на дендритах з'єднані канали в напівпроникній постсинаптичній мембрані, які контролюють рух іонів через мембрану. У спокої нейрон має електричний потенціал 70 мілівольт (потенціал спокою), при цьому внутрішня сторона мембрани заряджена негативно по відношенню до зовнішньої. Хоча існують різні медіатори, всі вони надають на постсинаптичний нейрон або збудливу, або гальмівну дію. Збудливий вплив реалізується через посилення потоку певних іонів, головним чином натрію і калію, через мембрану. В результаті негативний заряд внутрішньої поверхні зменшується - відбувається деполяризація. Гальмівний вплив здійснюється в основному через зміну потоку калію і хлоридів, в результаті негативний заряд внутрішньої поверхні стає більшим, ніж в спокої, і відбувається гіперполяризація.

6.6. Моделювання провідності синаптичного контакту при побудові молекулярних запам'ятовуючих структур.

Для побудови моделі формування молекулярних запам'ятовуючих структур на основі синаптичних мереж природного інтелекту необхідно застосовувати формалізми, які використовують нейробіологічні принципи. Однією з важливих умов є вимога до мережі, яка повинна бути універсальною в тому сенсі, що єдина архітектура і алгоритм навчання повинні забезпечувати рішення найрізноманітніших завдань, пов'язаних з класифікацією, розпізнаванням образів, узагальненням, встановленням зв'язків між різними подіями, образами,

класифікаціями. При цьому передбачуваність результатів навчання виходить з топології мережі, яку завжди можна заздалегідь передбачити, а також результат її роботи виходячи з умов задачі. Також важливою умовою є необхідність створення легкості проектування мережі під конкретну задачу.

Тут слід підкреслити, що синаптична мережа має інструменти для створення автоматично конфігурованої топології виходячи з аналізу вхідних і вихідних даних. При цьому запускається та чи інша програма автоматичної побудови зазначеної топології. Виходячи з парадигми побудови синаптичних мереж, завжди генерується єдина і оптимальна для даного завдання мережа. Стійкість до спотворених вхідних даних є такою, що при рівномірному випадковому розподілі величина помилок не може перевищувати половини обсягу навчаючої вибірки [6.19].

Також дуже важливою в нашому дослідженні представляється роль синапсів в побудові топологій синаптичних мереж. В даний час очевидно, що нейрон обробляє тільки частину інформації, будучи по суті лише генератором імпульсів, керує ж нейроном синапс, дозволяючи нейрону генерувати імпульс, а також задаючи частоту і силу цього імпульсу [6.20].

Використовуючи властивості і функції синапсу як керівної ланки при роботі нейрона, а також з огляду на особливості системи дендрит-синапс-нейрон-ядро-аксон в даній роботі ставилося завдання запропонувати і дослідити етапи моделювання провідності синаптичного контакту при побудові молекулярних запам'ятовуючих структур природного інтелекту. Також необхідно було показати, яким чином при надходженні інформації в ядро, в ньому приймається рішення про підтримку стану синапсу і здійснюється передача відповідних сигналів в зону синаптичного контакту.

Використання математичних моделей дозволяє вирішувати такі завдання, як задача ефективного запам'ятовування в молекулярних структурах. Таке завдання використовує неповну або неточну вхідну інформацію про об'єкт. Дослідження в цій галузі дозволяють прийти до розуміння роботи молекулярного елемента пам'яті, що володіє властивостями, схожими на людську пам'ять. Такий підхід дає можливість вирішувати задачі розпізнавання образів, пошуку і створення експертних систем

[6.10] Таким чином, при використанні різних мереж для проходження сигналу архітектура мережі не змінюється, змінюється тільки кількість нейронів і синапсів.

У стані спокою потенціал нейрона дорівнює U_0 . Для того, щоб нейрон був активований, потрібно змінити потенціал нейрона на величину, що перевищує поріг нейрона U_p . При цьому поріг нейрона - це величина, що залежить від стану нейрона, а також від часу перебування нейрона в цьому стані [6.21]. Тому поріг нейрона є функцією, яка залежить від часу - $U_p(t)$.

Як було сказано вище, нейрон буде активований, коли згідно (6.5):

$$\Delta U(t) = U_p(t), \quad (6.5)$$

де $\Delta U(t)$ – зміна потенціалу нейрона, що представляє собою змінну напругу на ємності мембрани під час проходження через неї синаптичного струму I_d .

Такий струм описується за допомогою α -функції [6.22], яка характеризує різкий стрибок постсинаптичного потенціалу після активації нейрона, а також його повільне згасання за формулою (6.6):

$$I_d(t) = g_{syn} \alpha(t - \tau_d) I_0, \quad (6.6)$$

де g_{syn} - максимальна синаптична провідність синаптичного контакту в нейроні, I_0 - синаптичний струм в момент генерації потенціалу дії, τ_d - постійна затримки, що характеризує час поширення нейромедіаторів в аксоні. У загальному випадку можна припустити, що за умови $\tau_d = 2\text{мс}$ можемо отримати вираз (6.7):

$$\alpha(t) = \frac{t}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (6.7)$$

де τ – постійна, яка характеризує синаптичний час – час дифузії нейромедіатора в синаптичній щілині від пресинаптичної до постсинаптичної мембрани.

Тепер напишемо рівняння для визначення $\Delta U(t)$ [6.22] (6.8):

$$\frac{d\Delta U(t)}{dt} + \frac{1}{\tau_2} \Delta U(t) = \frac{1}{C} I_d(t), \quad (6.8)$$

де $\tau_2 = R_M C$ – стала часу мембрани, R_M , C – опір та ємність мембрани відповідно.

Змінна t представляє собою час, що пройшов з початку запуску системи. Таким чином можна вважати, що $\Delta U(0) = 0$. Вирішивши рівняння (6.8), враховуючи цю умову, одержимо наступний вираз $\Delta U(t)$ [6.22] (6.9):

$$\Delta U(t) = \frac{1}{C} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \int_0^t I_d(x) e^{\frac{x}{\tau_2}} dx \quad (6.9)$$

Для більш розгорнутого рішення рівняння (6.9) скористуємось рівняннями (6.6) та (6.8), які описують синаптичний струм I_d і отримаємо (6.10):

$$\Delta U(t) = \frac{1}{C} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \int_0^t g_{syn} I_o \frac{(x - \tau_d) e^{\frac{x}{\tau_2} - \frac{x - \tau_d}{\tau}}}{\tau} dx \quad (6.10)$$

Вирішивши це питання, отримаємо (6.11):

$$\Delta U(t) = \frac{g_{syn} I_o}{C \tau} e^{-\frac{\tau_d}{\tau}} \left(e^{-\frac{t}{\tau}} (2t^2 + (\frac{\tau \tau_2}{\tau - \tau_2} - \tau_d)t - \frac{\tau \tau_2 \tau_d}{\tau - \tau_2}) - \frac{\tau \tau_2 (t - \tau_d)}{\tau - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \quad (6.11)$$

Отримана вище формула працює тільки для одного синапсу. Для того, щоб визначити повну зміну потенціалу нейрона, слід підсумувати отримані формули з урахуванням кожного синапсу згідно виразу (6.12):

$$\Delta U(t) = \sum_{i=0}^n \Delta U_i(\mathcal{A}_i) \quad (6.12)$$

де $\Delta U_i(\mathcal{A}_i)$ – визначається для кожного i -го синапсу за допомогою виведеної вище формули, $\mathcal{A}_i = t - t_i$ – час існування імпульсу до моменту t . Таким чином нейрон буде активований, коли буде виконана умова (6.13):

$$\sum_{i=0}^n \Delta U_i(\mathcal{A}_i) = U_p(t) \quad (6.13)$$

Як було сказано вище, активація нейрона приводить до генерації потенціалу дії, а також передачі синаптичного струму, який веде до всіх «прив'язаних» нейронів.

Зміну порога нейрона у стані відносної рефрактерності можна описати наступним чином [6.22] (6.14):

$$U_p(t) = U_p(0) + Ee^{-t/\tau}, \quad (6.14)$$

де τ – стала, яка характеризує тривалість періоду відносної рефрактерності, E – величина порога нейрона на початку періоду відносної рефрактерності, $U_p(0)$ – поріг нейрона в стані спокою.

У момент активації нейрона відбувається генерація потенціалу дії і передача синаптичного струму іншим нейронам. Для визначення цього струму слід скористатися моделлю [6.22].

Іонний струм, що проходить через мембрану, являє собою суму трьох іонних струмів: натрієвого I_{Na} , калієвого I_K і струму інших іонів I_L згідно (6.15):

$$I_I = I_{Na} + I_K + I_L \quad (6.15)$$

Всі ці три струми можна описати в термінах йонної провідності (6.16), (6.17), (6.18):

$$I_{Na} = g_{Na}(U - U_{Na}) \quad (6.16)$$

$$I_K = g_K(U - U_K) \quad (6.17)$$

$$I_L = g_L(U - U_L) \quad (6.18)$$

де U_{Na} , U_K , U_L – рівноважний натрієвий, калієвий і інший іонний потенціали відповідно, U – потенціал мембрани в даний момент часу.

Функції g_{Na} , g_K , g_L відповідають за іонну провідність нейрона. Тепер можна визначити струм, який буде передаватися через синапси іншим нейронам в момент генерації потенціалу дії по формулі (6.19):

$$I_0 = I_I + I_{syn} + C \frac{dU}{dt}, \quad (6.19)$$

де I_{syn} – загальний синаптичний струм, який представляє собою суму всіх окремих синаптичних струмів, описаних в (6.15).

Для побудови узагальненої моделі формування молекулярного запам'ятовуючого елемента використаємо ряд формалізмів, включаючи поняття програмних агентів у вигляді ділянок на молекулах керуючих білків і ряду спеціальних генів.

При протіканні струму від збуджених нейронів через синапси в прямому напрямку на них запам'ятовуються поточні результати розпізнавання. Такому запам'ятовуванню відповідає збільшення прямих і зворотних ваг (прямой і зворотної провідності) цих синапсів. В цьому випадку використаємо (6.20):

$$g_{ij}(t) = g_{ij}(t - 1) + B(I_{ij}(t)), \quad (6.20)$$

де $g_{ij}(t - 1)$ - число одиничних образів (ОО), що запам'ятались на синапсі на попередньому часовому такті; $B(I_{ij}(t))$ - ефект від взаємодії нейронів при протіканні струму $I_{ij}(t)$ через синапс в прямому напрямку. При проходженні струму прямі і зворотні ваги синапсів (зворотні і прямі провідності) зменшуються. Амплітуду імпульсного струму, що проходить в прямому напрямку через кожен синапс щодо моменту часу t , можна визначити як (6.21):

$$I_{ij}(t) = I_{cp} I_{j\Sigma}(t) w_{ij}(t) \delta_i(t) / \sum_{j=1}^n w_{ij}(t), \quad (6.21)$$

де $w_{ij}(t)$ - прямі ваги (провідності) синапсів; I_{cp} - середня амплітуда струму, $I_{j\Sigma}(t)$ - сумарний струм відображення одиничних образів запам'ятовування від j -го нейрона, $\delta_i(t)$ - функція, що приймає значення 1, коли i -й нейрон збуджений.

Оскільки нейрон являє собою пороговий елемент і на його входах є збуджуючі та гальмівні синапси, то сам нейрон є суматором для визначення зваженої суми ваг синапсів як реакції на вхідні сигнали у вигляді синаптичних струмів. При перевищенні такої суми порога нейрона виробляється вихідний сигнал згідно рівняння (6.22):

$$Y_j = F(\text{net}_i w_{ji} X_i - K_j) P_{np}, \quad (6.22)$$

де j - номер нейрона в мережі, X_i - вхідний сигнал, Y_j - вихідний сигнал нейрона, w_{ji} - ваги синапсів, net_i - сумарний вхідний вплив на нейрон, K_j - поріг нейрона, $F(x)$ - активаційна функція, що спрацьовує при досягненні порогового сумарного значення струму на групі синапсів, $P_{пр}$ - показник міцності синапсу.

Процеси, що відбуваються при протіканні струмів через синапси під час запам'ятовування одиничних образів дозволяють використовувати поняття програмних агентів, які отримують інформацію через систему молекулярних сенсорів про стан керованих ними процесів і здійснюють вплив на них через систему актуаторів, які передають вплив з керуючого пристрою на об'єкт керування. Щоб активно виконувати свої функції, інтелектуальні агенти зазвичай мають ієрархічну структуру, яка включає багато субагентів. Такими в нашому випадку є ділянки на молекулах керуючих білків і ряд спеціальних генів. Для роботи зазначених агентів необхідно прийняти наявність своєрідного розподільника функцій агентів, який оновлює комунікаційні залежності між агентами і локально сформованими групами агентів на різних вузлах синаптичної мережі. Комунікаційна залежність $C_{ij}(t)$ між i -им агентом і j -ою групою агентів в момент часу t визначається за формулою (6.23):

$$C_{ij}(t) = \sum \alpha (M_{ij}(t) / \sum_k M_{ik}(t)) + (1-\alpha) C_{ij}(t-1), \quad (6.23)$$

де $M_{ij}(t)$ - число повідомлень, відправлених i -им агентом агентам j -ої групи агентів за період часу t , α - коефіцієнт, що характеризує відносну значимість нової інформації, $\sum_k M_{ik}(t)$ показує кількість повідомлень, відправлених i -им агентом для інших агентів, спільно функціонуючих на загальному вузлі синаптичної мережі, $C_{ij}(t-1)$ - значення тієї ж комунікаційної залежності на попередньому інтервалі часу.

Важливим параметром стійкості формування молекулярного елемента в синаптичній мережі є показник міцності синапсу $P_{прс}$, який залежить від процесів, що відбуваються при протіканні струмів через синапси під час запам'ятовування одиничних образів. Міцність синапсів обумовлює рівень пам'яті: чим сильніше з'єднання між нейронами, тим довше буде працювати конкретний нейронний ланцюг, який

зберігає певну інформацію. Однак занадто сильний синапс може стати причиною перезбудження нейронів, що в підсумку виливається в хворобливий стан.

Від міжнейронного з'єднання вимагається подвійне завдання: з одного боку, синапс повинен підтримувати надійне проведення значимого сигналу, з іншого - зобов'язаний бути до певної міри слабким, щоб не допускати абсолютно безперешкодного отримання сигналів, який може перезбудити нейронний ланцюг. В [6.23] показана роль спеціального білка $A_{гс}$, який накопичується в синапсах при запам'ятовуванні нової інформації. Після формування запам'ятовуючих структур в синапсі цей білок йде із зони синапсу і направляється в ядро нейрона. Зазначені переміщення забезпечують в самій молекулі білка три ділянки. Один фрагмент забезпечує пересування білка в ядро, інший - з ядра, третій утримує $A_{гс}$ в ядрі.

Такі функції зазначеного білка можуть бути описані наступними рівняннями (6.24) і (6.25):

$$P_{np-c} = \sum_{k=1}^n P_{об-с} + P_{я} + P_{ся} + P_{яс}, \quad (6.24)$$

де $P_{яф-аг с}$ - показник міцності синапсу, $P_{об-с}$ - активація фрагмента білка $A_{гс}$ на навчання синапсу при запам'ятовуванні нової інформації, $P_{я}$ - активація фрагмента в ядрі нейрона, $P_{ся}$ - активація фрагмента при пересуванні з синапсу в ядро, $P_{яс}$ - активація фрагмента при пересуванні з ядра в синапс.

$$P_{яф-агс} = \sum_{i=1}^n P_{агс} \cdot P_{нс} \cdot P_{ос}, \quad (6.25)$$

де $P_{яф-аг с}$ - сумарний вплив ядерного фрагмента білка $A_{гс}$ при формуванні молекулярного запам'ятовуючого елемента в синаптичній мережі, $P_{агс}$ - активація фрагмента білка по включенню генів формування синапсу, $P_{нс}$ - активація фрагмента білка при створенні нового синапсу, $P_{ос}$ - активація фрагмента молекули білка при ослабленні синапсу.

Таким чином процес формування молекулярного запам'ятовуючого елемента в синаптичній мережі може бути представлений у вигляді системи рівнянь (6.26) –

(6.30):

$$I_{ij}(t) = I_{cp} I_{j\sum}(t) w_{ij}(t) \delta_i(t) / \sum_{j=1}^n w_{ij}(t); \quad (6.26)$$

$$Y_j = F(\sum_i w_{ji} X_i - K_j) P_{np}; \quad (6.27)$$

$$C_{ij}(t) = \sum \alpha (M_{ij}(t) / \sum_k M_{ik}(t)) + (1-\alpha) C_{ij}(t-1); \quad (2.28)$$

$$P_{np-c} = \sum_{k=1}^n P_{об-с} + P_{я} + P_{ся} + P_{яс}; \quad (6.29)$$

$$P_{яф-arc} = \sum_{i=1}^n P_{агс} \cdot P_{нс} \cdot P_{ос}. \quad (6.30)$$

Отримана система рівнянь дозволяє використовувати останню в практичних експериментах з отримання та вивчення молекулярних запам'ятовуючих елементів, а після відповідних напрацювань, і запам'ятовуючих молекулярних пристроїв, на три з яких були отримані авторські свідоцтва.

Використовуючи математичну модель функцій синапсу як керівної ланки при роботі нейрона в роботі досліджено етапи побудови молекулярних запам'ятовуючих структур шляхом реалізації моделі провідності синаптичного контакту.

Показано, що при надходженні інформації в ядро, в ньому приймається рішення про підтримку стану синапсу і здійснюється передача відповідних сигналів в зону синаптичного контакту.

Дані формули є математичною моделлю синаптичного контакту. Вони описують передачу імпульсу між синапсами нейронів, процес зміни порогу нейрона в залежності від стану синапсу, процес зміни потенціалу нейрона, а також струм, який передається по синапсах в момент генерації потенціалу дії для активації нейрона.

6.7. Моделювання процесів, що пов'язують пам'ять з генетичними структурами нейрона.

Існує кілька моделей, що пов'язують пам'ять з генетичними структурами нейрона. Передбачається, що навчання викликає процес експресії генів, який забезпечує синтез багатьох класів білків. Відповідно до цієї моделі, білок-1, який синтезується

під час навчання, активує специфічні гени, що кодують РНК. РНК визначає, в свою чергу, синтез білка-2. Білок-2 бере участь в консолідації пам'яті завдяки зміцненню синаптичних зв'язків. В даний час ця модель отримала своє підтвердження на багатьох об'єктах як із застосуванням гель-електрофорезу білків, так і за допомогою радіоактивних методів [6.24].

Перша фаза активації відповідає індукції «ранніх генів», наприклад гена *c-fos*. В даний час клоновано близько ста ранніх генів, їх продукти є регуляторними білками. Ранні гени контролюють транскрипцію пізніх генів, що кодують білки-2 за допомогою регуляторних білків (білків-1), які впливають на промоторні області пізніх генів. Експресія ранніх генів зникає з автоматизацією навички.

Розглянемо двофазну модель синтезу білка як основу довготривалої пам'яті, запропоновану в [6.24] (рис.6.10).

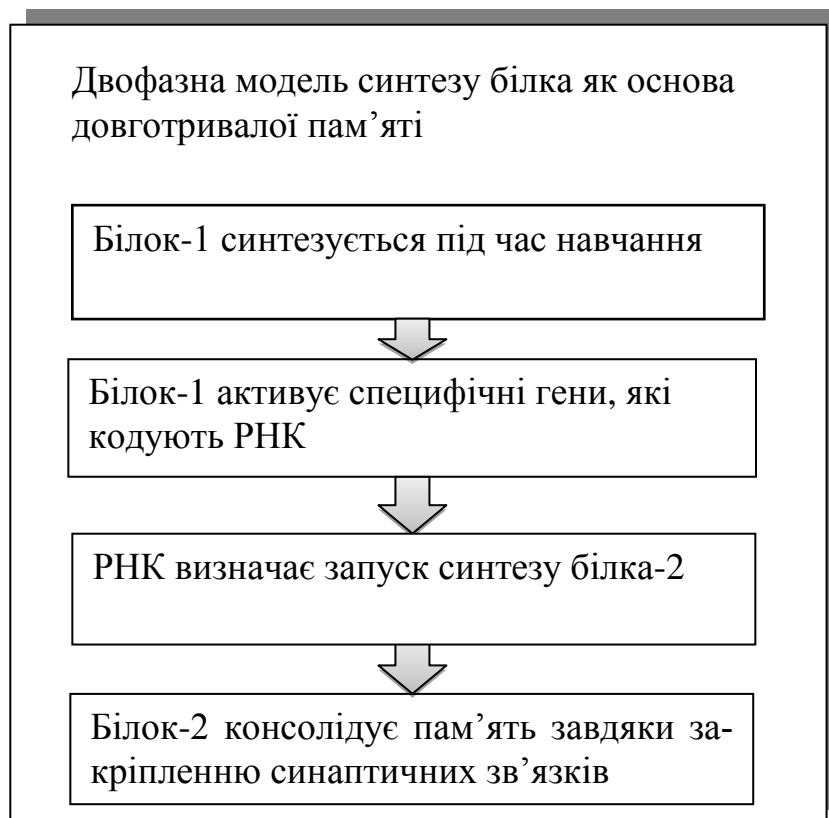


Рис.6.10. Двофазна модель синтезу білка при формуванні довготривалої пам'яті.

В [5.32] виявлено спільність молекулярного каскаду експресії генів при навчанні та розвитку. Передбачається, що пам'ять використовує той же генетичний апарат, який пов'язаний з онтогенезом, зростанням і диференціюванням клітин. Ключову

роль в цих процесах відіграють екстраклітинні сигнали, які активують вторинні посередники. Вторинні посередники (месенджери) вивільняють протеїнкінази, які транспортуються в ядро, викликаючи в кінцевому підсумку експресію ранніх генів.

Існує два механізми зміни синаптичних контактів при навчанні: функціональна теорія говорить про зміну співвідношень активних і пасивних синапсів без зміни загального числа синапсів, а структурна теорія передбачає створення нових синапсів в процесі навчання [5.32].

Нейропептиди також беруть участь в процесах навчання і пам'яті і можуть розглядатись в якості маркерів специфічних нейронних шляхів [6.25-6.28].

Макромолекулярні механізми пам'яті засновані на структурних змінах нейронів, які забезпечуються синтезом білка. Пригнічення білкового синтезу на тлі вироблення рефлексу зберігає рефлекс протягом десятків хвилин, але через годину і добу спостерігаються грубі порушення в цілості навичок. Це вказує на провідну роль білка в консолідації енграми.

Згідно [6.25], мембрана нейрона проектується на геном. Ділянка генома з експресійними або депресійними генами відповідає локусу мембрани, який містить специфічний рецепторний білок з транслокаційною групою (рис.6.11).

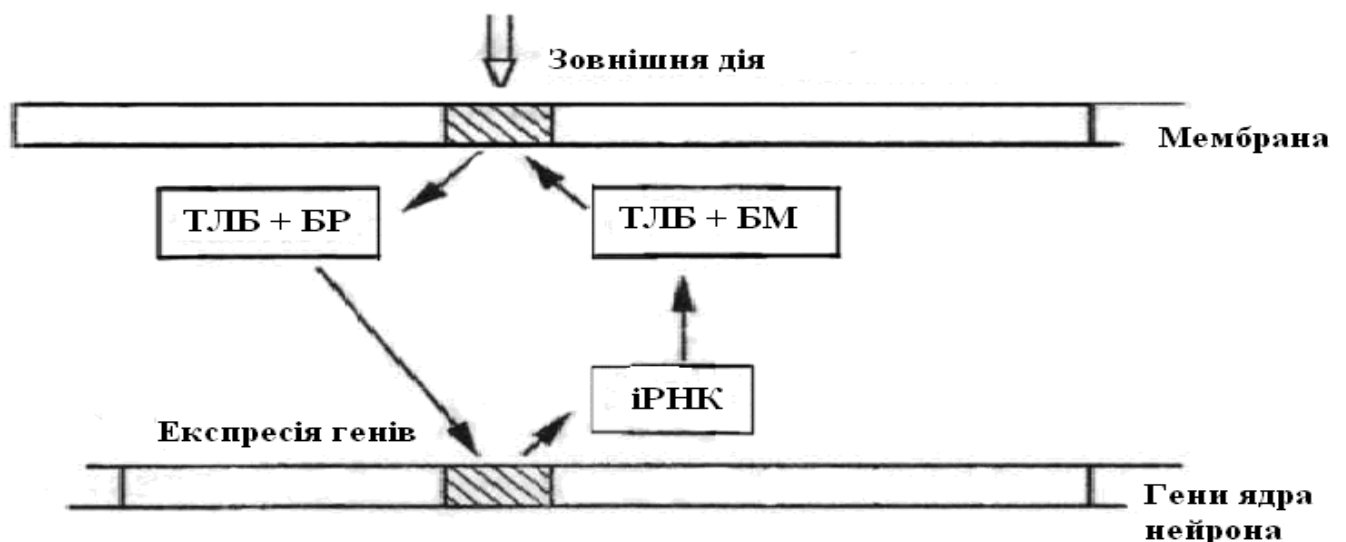


Рис. 6.11. Схема відображення мембрани на геномі нейрона: Тлб - транслокаційних білок, БР - білок-регулятор, БМ - білок-модулятор, іРНК - інформаційна рибонуклеїнова кислота.

В даний час виділено два нейроспецифічних білки, що беруть участь в механізмах пам'яті [5.32]. У гіпокампі особливо збільшується вміст білка S-100, а в корі головного мозку білка 14-3-2. Синтез білка необхідний на стадії консолідації пам'яті під час навчання і відразу після нього; для зберігання інформації він вже не потрібен.

Активація білка і переміщення білка-регулятора певної ділянки геному викликає експресію генів. У результаті синтезується білок-модулятор, який транспортується до тієї ділянки мембрани, яка була активована.

Експресія генів, викликана одноразово, потім довго утримується, забезпечуючи синтез білків, що регулюють роботу рецепторів. Вироблення нового умовного рефлексу активує іншу комбінацію синапсів і нейромедіаторів. Синтез білків-модуляторів впливає на ефективність протеїнкіназ, які регулюють закриття калієвих каналів.

Таким чином, головним завданням біохімічної машини в нейроні є, як побудова, так і ліквідація білкових комплексів при формуванні молекулярної і нейронної пам'яті в процесах навчання (Рис.6.12).

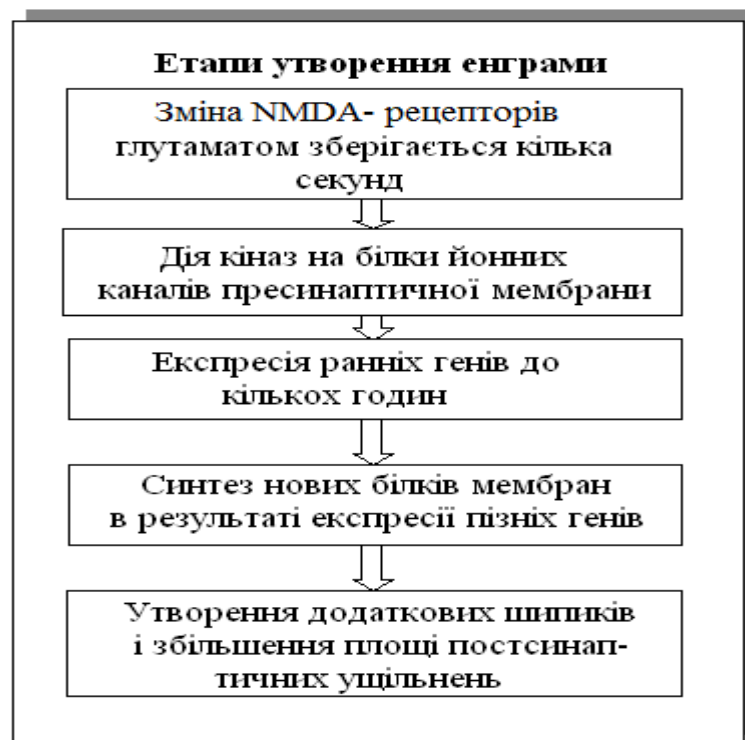


Рис.6.12. Етапи утворення енграми.

Нейропептиди грають роль в консолідації пам'яті, надаючи пре- і постсинаптичну модулюючу дію. Пептид-супутник може підвищувати спорідненість рецепторів постсинаптичної мембрани до медіатора в тисячі разів, крім того, він більш стабільний, що забезпечує пролонгування проведення через синапс. Нервовий імпульс надходить в відросток пресинаптичного нейрона - аксон, де він стимулює викид сигнальних молекул, які потім зв'язуються з рецепторами відростка постсинаптичного нейрона - дендритом. Це, в свою чергу, активізує ферменти - кінази, що забезпечують нанесення спеціалізованої інформації на контактну поверхню синапсу, подібно до того, як цифрова інформацію наноситься на поверхню компакт-диска.

Електрофізіологічні процеси запускають нейрохімічні та нейроструктурні зміни в нейронах, які на початкових етапах йдуть паралельно і відрізняються часом протікання цих процесів.

Розглянемо можливий механізм запуску безпосередньо ранніх генів (БРГ) в мозку при навчанні. На початку процесу навчання в мозку активуються гени транскрипційних факторів. Першими генами, активація яких була виявлена в мозку при навчанні, виявилися БРГ, що кодують транскрипційні фактори. БРГ були вперше виявлені при вивченні механізмів геномної відповіді на дію чинників росту, що запускають процеси клітинного циклу [6.25]. Індукція їх транскрипції відбувалася незважаючи на підведення інгібіторів синтезу білка, тобто будувалася на механізмах, заздалегідь готових для сприйняття екстраклітинних стимулів. Перші з ідентифікованих продуктів генів даного сімейства виявилися ядерними білками, які зв'язуються з ДНК і регулюють транскрипцію інших генів.

За цим властивостями дані гени значно нагадували групу БРГ бактеріофагів і еукаріотичних ДНК-вірусів, тому, за аналогією з вірусними генами, ця група генів, які швидко активуються, отримала назву "клітинних безпосередніх ранніх генів". Це ж сімейство часто позначається як "гени первинної відповіді" [6.26].

Одним з перших в даній групі був клонований ген *c-fos*. Його структура і властивості добре вивчені, і він може служити прототипом генів даного сімейства. Спочатку було встановлено, що в ході ембріонального розвитку *c-fos* грає важливу роль в регуляції процесів клітинного росту і проліферації. В середині 1980-х років

кілька дослідницьких груп виявили експресію гена c-fos в мозку дорослих тварин, які навчались [6.26].

Це спричинило за собою широкий спектр досліджень участі цього та інших БРГ в самих різних завданнях навчання [6.26] (табл.6.1).

Табл.6.1. Властивості експресії безпосередніх ранніх генів в мозку.

№ п/п	Властивості експресії безпосередніх ранніх генів в мозку.
1	В мозку до навчання транскрипція більшості БРГ знаходиться на складному недетектуючому рівні
2	При постановці завдання перед навчанням - при втраті результативності вироблених дій, при несподіваних впливах середовища або зникнення звичних і очікуваних подій відбувається швидка активація транскрипції БРГ в нервовій системі
3	Транскрипція у вигляді копіювання БРГ починається зразу після попадання тварини в ситуацію навчання
4	Локалізація активності БРГ при навчанні в нервових клітинах
5	Патерни клітин, що експресують ранні гени, мають системний характер і локалізовані в великих районах мозку
6	Аналіз топографії експресії залежить від характеру навчання
7	Експресія БРГ регулюється навчанням в різні терміни від народження до дорослого віку
8	Активація БРГ відключається при втраті новизни впливу або після завершення вироблення і автоматизації нової навички
9	Звичайна поведінка, виконання придбаних автоматизованих навичок, знайомі сигнали і події або знаходження в звичному середовищі не ведуть до експресії БРГ

Гени, експресія яких знаходиться під контролем індукованих транскрипційних факторів, були названі, по аналогії з вірусними системами, "пізніми" генами, "генами пізньої відповіді" або "ефекторними" генами, а весь двофазний механізм регуляції транскрипції за участю цих двох класів генів є одним з найбільш універсальних способів забезпечення процесів клітинного ділення і зростання в розвитку.

6.8. Вивчення можливостей програм ДНК в синтезі білків при формуванні молекулярної пам'яті шляхом фіксування подій на молекулярному рівні в синапсах.

Досліджуючи можливості програм ДНК в синтезі білків для молекулярної пам'яті, необхідно відзначити величезну ієрархію програм. При цьому білки після виконання програм розпадаються, а на зміну їм виробляються інші.

Розглянемо роботу молекулярної пам'яті при формуванні довготривалої пам'яті. Запам'ятовування відбувається в тому випадку, якщо в мозку утворюється еквівалент отриманого зовнішнього впливу у вигляді образу, переживання, поняття. Кожний вплив на мозок відбивається у вигляді певної зміни білків, які містяться в нервових клітинах - нейронах.

Значною мірою такі пакети програм вже розшифровані шляхом реєстрації відповідей синапсів на ті чи інші дії вхідних електричних потенціалів. В даний час серед нейробіологів, молекулярних інженерів і кібернетиків прийнятий комплексний підхід до пояснення механізмів пам'яті: вона є ознакою мозку як системи в цілому, а не його окремих молекулярних і клітинних компонентів.

Розглянемо послідовність роботи молекулярних структур клітини при введенні інформації в клітину. Під дією нервового імпульсу з синапсу виділяється речовина, яка сприймається певним рецептором. Це білкова молекула, що має ділянку - «замок», який відповідає «ключу» - речовині, що виділяється синапсом. Під дією цієї речовини в білковому рецепторі відбуваються певні зміни, і він через мембрану «включає» фермент, розташований вже всередині клітини. Цей фермент починає синтезувати певну речовину або викликає іншу біохімічну дію. Уже відомо багато процесів, якими в підсумку закінчується ланцюжок: синапс - синаптична речовина - білковий рецептор - мембрана - внутрішньоклітинний фермент.

На рис. 6.13 представлена спрощена схема одного з біохімічних механізмів, який дозволяє здійснювати введення інформації в клітинну молекулярну обчислювальну систему.



Рис.6.13. Спрощена схема введення інформації в клітинну молекулярну обчислювальну систему.

Розглядаючи механізм клітинного молекулярного комп'ютера (МК), необхідно додати до зазначеного вище переліку етапів введення інформації ще і синтез молекул РНК, в яких записувався б характер нервових імпульсів. Наведені вище положення засновані на реальних, твердо встановлених фактах, на дослідних даних сучасної молекулярної біології. В принципі все, що потрібно для роботи МК, в клітині є. Так, зокрема, цілком зрозуміло, що могли б представляти собою молекули-оператори, - це ферменти, які зшивають і розрізають молекули-слова – ДНК і РНК.

Можна досліджувати як влаштований вхід в машину, її вихід, а також як МК входить в єдину нейронну мережу. Виходячи з того, що є в наявності механізми, які

могли б виконувати й інші функції, можна описати вхід в МК. Таким входом є пристрій, який перетворює певні серії нервових імпульсів в певні зміни внутрішньоклітинних молекулярних структур. Таким чином на рис. 6.13 показаний процес перекладу інформації з мови електричних імпульсів на молекулярний мову.

Як зазначалося вище, на мембрані нейрона знаходиться велика кількість рецепторів - білкових молекул з ділянками («замок»), до якого може прикріпитися тільки даний медіатор («ключ»). Медіатор, потрапивши на свій рецептор, призводить до деякої зміни його структури, це зміна якимось чином передається ферменту (наприклад, аденілатциклазі), який також розташований в мембрані, але вже з внутрішньої її сторони. За командою рецептора фермент, повернений усередину клітини, починає виробляти молекули-слова.

Наведений вище механізм реально існує і працює. І цілком реально може представляти один з механізмів вхідного пристрою молекулярного комп'ютера. Можна описати і вихідний пристрій, який знаходиться всередині клітини і перетворює молекулярний код в послідовність нервових імпульсів.

Пам'ять молекулярного комп'ютера представлена довготривалою пам'яттю на основі молекул РНК або ДНК. Це дуже ємні «блокноти», їх багато, і навіть в одній клітині на РНК можна записати велику кількість інформації. Для короткочасної пам'яті підходять гліколіпіди і глікопротеїди - пов'язані з ліпідами і білками довгі розгалужені молекули цукрів. Їх можна швидко виростити на мембрані клітини, можна швидко стерти. Структура цих молекул дуже різноманітна, і на них теж можна записати багато різної інформації. З гліколіпідів, наприклад, можна виростити на мембрані деяку рельєфну подоби «картинки».

Необхідно відзначити, що нервові клітини в деяких випадках можуть використовуватися не як молекулярний комп'ютер, а як прості автомати типу формальних нейронів для обслуговування задач нейронних мереж. Включення блоків довготривалої пам'яті відбувається після початку прийому інформації в клітину і перебудови властивостей нейрона.

Розглянемо процес формування молекулярної пам'яті, який проходить в кілька етапів. Перехід пам'яті від одного рівня на інший вимагає нервової активності.

Пам'ять фіксується перші хвилини після того, як інформація надійшла в мозок - до 15 хвилин. Завершується перехід через 1-2 години, після якого пам'ять порушена бути не може [6.27].

Якщо дати іншу задачу в цей момент - інші склади, іншу картинку, - то попереднє завдання втрачається. Таким чином оперативна пам'ять очищається, не встигнувши зформувати більш глибокий рівень.

При переході відбувається перетворення великого обсягу з короткочасної пам'яті в довготривалу, із залишком 20-30% від вихідної інформації.

Підтвердження участі пептидів в механізмі роботи молекулярної пам'яті може бути перевірено експериментально. Так в досвіді людина була здатна запам'ятовувати інформацію, поки діяв введений йому пептид [6.26]. А як минула вказана дія, випробуваний не зміг згадати перервану інформацію. При повторному введенні того ж препарату пацієнт згадував раніше повідомлений йому текст. Іншими словами, така людина ставав своєрідним закодованим посланням, «розшифрувати» яке можна, запропонувавши йому пептид.

Ядерна регуляція характеризується змінами активності генів, тобто кількісними і якісними змінами ДНК-залежного синтезу РНК, що тягне за собою відповідні зміни синтезу білка. Причини цих процесів можуть бути різні. Порівняно велика тривалість макромолекулярних синтезів, так само як і час транспорту речовин від синаптичних структур до ядра і назад, обумовлюють сповільненість цієї форми регуляції. Завдяки вбудованим знову синтезованих макромолекул в мембрану і включенню їх в обмін речовин тривалість змін функцій синапсу виявляється достатньою для розвитку довгострокової пам'яті (ДП).

У цій моделі не робиться акценту на синтезі нових білків в нейроні - вона протистоїть поданням про утворення згадуваних вище "молекул пам'яті" і про кодування пам'яті на молекулярному рівні. Вона скоріше ґрунтується на системних властивостях мозку, на топології міжнейронних зв'язків. Можна спочатку звернутися до процесів утворення ДП і лежачим в їх основі клітинним регуляторним механізмам. Як уже згадувалося, дослідження, що проводилися до цього часу, не привели до яких-небудь однозначних і остаточних результатів. Крім труднощів біохімічного

аналізу *in vivo*, істотну роль повинні грати особливості експерименту з навчання. Можна вважати, що обсяг популяцій клітин і інтенсивність біохімічних процесів, що беруть участь в навчанні, зростають в міру ускладнення процесів навчання і тому легше можуть бути виявлені за допомогою відповідних методичних прийомів. Однак, слід мати на увазі, що надмірно складний поведінковий експеримент, що вимагає для завершення багатьох годин або навіть днів може вести до перекриття в часі процесів навчання і консолідації слідів пам'яті. З цієї причини необхідно було знайти методичний компроміс.

Для розуміння ролі гіпокампу в процесах формування молекулярної пам'яті розглянемо клітинну модель утворення сліду пам'яті (Рис.6.14).

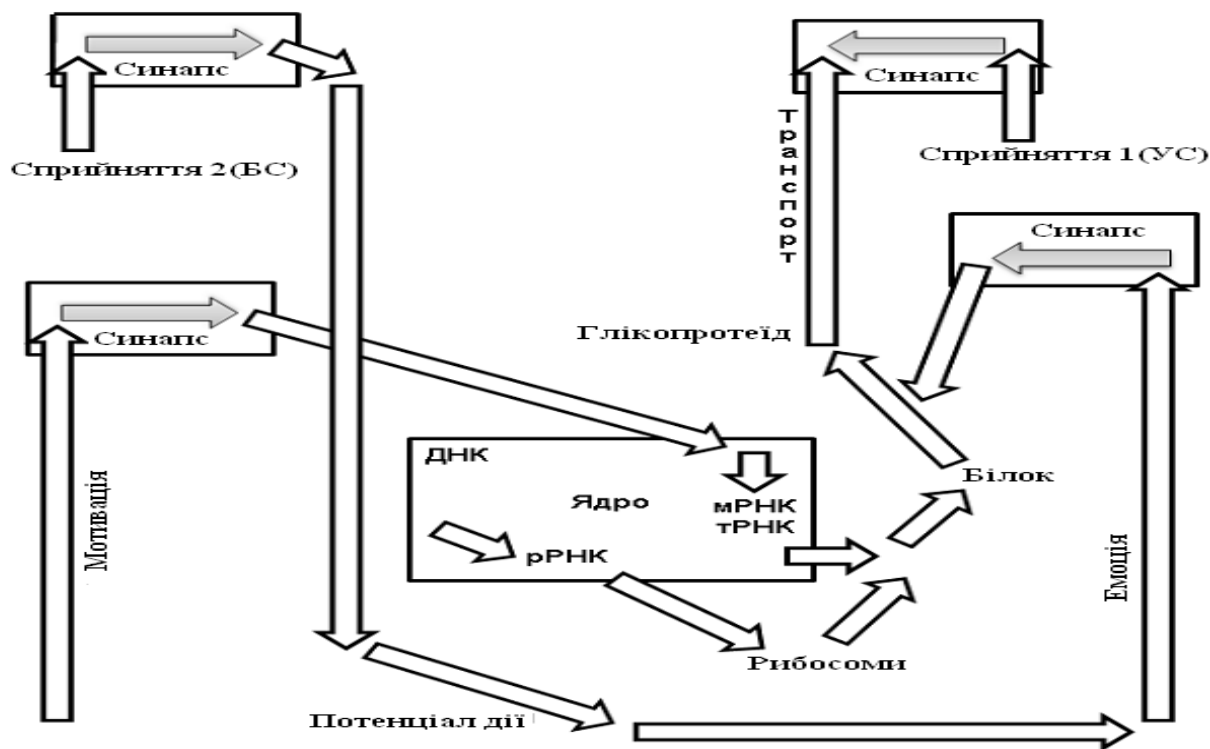


Рис.6.14. Клітинна модель утворення сліду пам'яті.

Беручи до уваги складність контролю, слід отримати додаткові результати для підтвердження виявлених закономірностей. Були поставлені спеціальні дослідження щодо посилення ритмічної активності в гіпокампі. Вони також викликали подібну активацію не процесом навчання, а шляхом електричної стимуляції особливої мозкової структури-перегородки. При запам'ятовуванні виникають зв'язки гіпокампу з нервовими волокнами і закінченнями, які містять ацетилхолін, через які він мо-

же спонукатись до ритмічної активності. Після подразнень, які за механізмом збігаються з виробленням реакції зорового диференціювання, можна визначити білковий синтез і утворення глікопротеїдів [6.28].

Розглянемо роль гіпокампу в процесах формування молекулярної пам'яті на прикладі клітинної моделі утворення сліду пам'яті (Рис.4.14). Після активації синапсу (умовний стимул, УС) виникає короткочасна локальна фасилітація, яка посилюється за рахунок активації іншого синапсу (безумовний стимул, БС) і деяких інших чинників. Одночасно активація клітини неспецифічно стимулює синтез РНК і білка. Певну роль в цьому, ймовірно, грає і вплив "мотиваційного" входу. Емоційні реакції індукують посилення синтезу глікопротеїдів. Глікопротеїди транспортуються в дендрити. Їх вбудовування в постсинаптичні мембрани стабілізує до цього короткочасно фасилітовані синапси, завдяки чому досягається тривале підвищення їх провідності і поширення збудження при повторній активації синапсу УС. Хоча це спрощена схема клітинних змін в нервовій мережі, вона дає уявлення про процеси формування складного сліду пам'яті.

Підвищене утворення глікопротеїдів можна вважати більш характерним для перебудов функціональних структур при розвитку довготривалої пам'яті, ніж первинний синтез білка. Тепер важливо визначити, що викликає синтез білків і глікопротеїдів і які макромолекули при цьому утворюються.

Як показано в [6.29], включення блоків довготривалої пам'яті відбувається через 10 хвилин після початку процесу ініціації прийому інформації в клітину за рахунок перебудови біологічних властивостей нервової клітини.

Вважається, що під час навчання в нервові клітини приходить чутлива аферентна пульсація, яка викликає кількісну активацію синтезу РНК і білка [6.29]. Це може приводити або до встановлення нових синапсів між новими групами клітин, або до перебудови існуючих синапсів. Поряд з цим, процес запам'ятовування може супроводжуватися активацією синтезу нуклеїнових кислот і білка. Синтезовані молекули є сховищем інформації.

Положення про те, що синтезовані молекули білка представляються своєрідним середовищем-сховищем інформації про запам'ятовані події дозволяє краще розуміти

роботу програмного комплексу клітини. При цьому сон також працює на довготривалу пам'ять. Нічний сон зі збільшеною парадоксальною фазою призводить до того, що переробка сприйнятого в збільшеній парадоксальній фазі сну призводить до вирішення будь-якої проблемної ситуації. Останнє твердження пов'язане з тим, що формування довготривалої пам'яті в істотній своїй частині закінчується під час сну.

Особливо необхідно відзначити, а точніше вказати на зв'язок формування довготривалої пам'яті і знаходження рішення задачі, яка інтенсивно обмірковувалася напередодні. Так, знаходження потрібного рішення з підсвідомості, де знаходиться 95% інформації, відбувається в стадії сну зі швидким рухом очей [6.29].

Однак серйозно претендувати на роль підкоркової «комори пам'яті» може тільки гіпокамп, що входить до складу лімбічної системи. У звичайних умовах гіпокамп забезпечує перенесення інформації про подію, що відбувається в даний момент в своєрідне депо, переводить її з короткочасної пам'яті в довготривалу. Його пірамідні нейрони здатні до інтеграції і диференційованого керування сигналами, які надходять з різних аферентних входів. З іншого боку, гіпокамп є своєрідним пристроєм для обліку помилок. Коли він відсутній або несправний, людина повторює свої помилки. Проведення величезного числа дослідів допомогло створити уявлення про гіпокамп як центр, який затримує реакції організму. Така специфічна затримка пояснюється особливою властивістю гіпокампу як своєрідного молекулярного бар'єру, що пропускає важливі відомості в довготривалу пам'ять.

Встановлено, що для гіпокампу характерні тета-хвилі [6.30]. Хвилі тета-ритму мають частоту 4-8 Гц, період їх коливань становить 150-250 мс. У стані неспання людини частоти тета-ритму представлені, як правило, у вигляді окремих коливань або невеликих груп хвиль з амплітудою напруженості електричного поля 20-60 мкВ. У процесі навчання, створення короткочасної пам'яті і реакцій на сигнал «що це?» в гіпокампі реєструється електрична активність з частотою в межах тета ритму. Звідси тета - ритм передається іншим утворенням, які налаштовуються на запам'ятовування поточної події і перенесення його з депо короткочасної пам'яті в сховище довготривалої пам'яті. Таким чином, можна назвати тета ритм ритмом уваги, початковою фазою утворення тимчасових синаптичних зв'язків.

6.9. Дослідження процесів формування запам'ятовуючих структур шляхом прийому електричних сигналів для активації генів в клітинному ядрі.

Дослідження етапів формування запам'ятовуючих структур доцільно почати від прийому електричних, а потім і хімічних сигналів нейроном для активації генів в його ядрі. Отримавши необхідну інформацію, гени направляють свою відповідь назад в синаптичні структури нейронів. Нижче будуть відображені етапи роботи зазначеного вище алгоритму формування структур молекулярної пам'яті (рис.6.15).

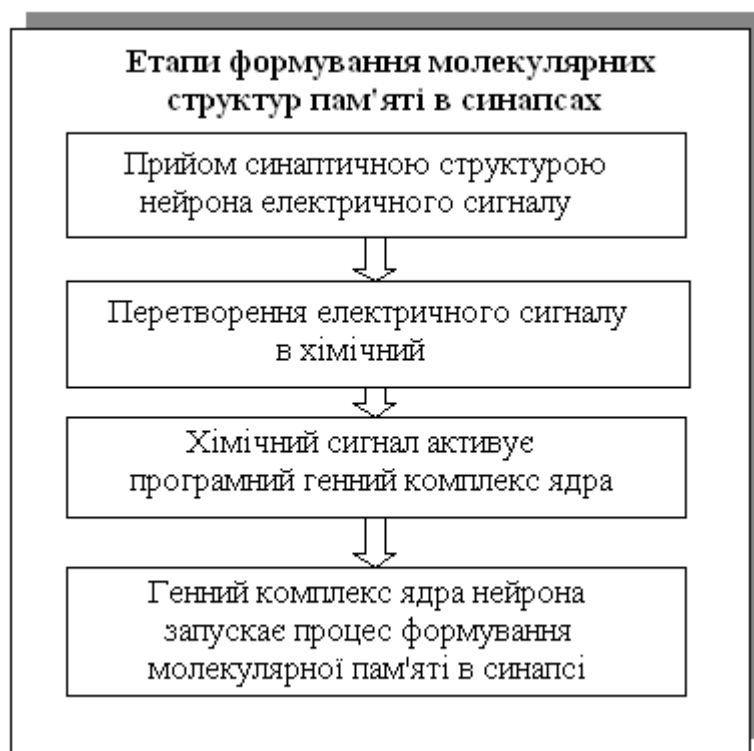


Рис. 6.15. Етапи формування запам'ятовуючих структур.

Для прийняття рішення, нейрон вирішує яким чином зберегти зв'язки в мережі, які відповідають за певну інформацію. Останню нейрон зберігає тільки в тому випадку, якщо її важливість була підтверджена. Процес перетворення поточної інформації в стійку пам'ять є наріжним каменем утворення структур молекулярної пам'яті. При пред'явленні учневі інформації, частина її зберігається в короточасній пам'яті і через кілька хвилин забувається. Однак частина інформації, яка нас дуже вражає, переходить в довготривалу пам'ять і може зберігатися там протягом всього

нашого життя. Механізм, який змушує мозок зберігати одні враження і дозволяє іншим зникнути, продовжує інтенсивно досліджуватися.

Оскільки довготривала і короткочасна пам'ять зберігаються в синаптичних мережах, то досить при роботі короткочасної пам'яті стимуляції синапсу, щоб тимчасово сенситизувати його, тобто підвищити ефективність проходження наступних сигналів.

Для забезпечення довготривалої пам'яті необхідно постійне підвищення ефективності синапсу. Для цього потрібно запустити синтез білків, що, в свою чергу, вимагає активації генів в ядрі нейрона.

При цьому необхідно знати, яким чином активність генів в ядрі клітини може керувати подіями в віддалених синапсах. Звідки ген "знає", коли потрібно посилити синаптичну зв'язок, а коли дозволити швидкоплинній миті зникнути безслідно.

Ті ж самі питання виникають при вивченні розвитку мозку у зародка, коли мозок вирішує, які синаптичні зв'язки зберегти, а які ліквідувати.

Проводячи численні дослідження з пошуку алгоритму «потрібних» програм активації генів в ядрі нейрона і подальшого підвищення ефективності синапсу шляхом запуску синтезу необхідних білків, дослідники зрозуміли, що відповідь була весь час у них перед очима.

Розглянемо етапи процесу проходження сигналу від синапсу до гену в ядрі і назад. Адже пам'ять формується при проходженні сигналів через синапси. Запам'ятовування відбувається тоді, коли у нервових клітин підвищується ефективність зв'язків, які називаються синаптичними. У разі короткочасної пам'яті ефект триває всього хвилини або години. При довготривалій пам'яті синаптичний зв'язок посилюється надовго. Як вказувалось вище, пам'ять формується як наслідок проходження сигналів через синапси.

Повідомлення починають передаватися від одного нейрона (пресинаптичної клітини) до іншого тоді, коли електричний імпульс, відомий як потенціал дії, досягне кінчика відростка першого нейрона, який називається аксоном.

Імпульс, що прийшов в закінчення аксона, змушує синаптичні пухирці, що зберігаються в пресинаптичному нейроні, вивільняти хімічні речовини, що зветься

нейромедіаторами, в синаптичну щілину - вузький зазор між аксоном і дендритом другого, постсинаптичного нейрона. Нейромедіатори зв'язуються з рецепторами на дендриті, запускаючи локальну деполяризацію мембрани постсинаптичного нейрона.

При цьому сигнал надходить в ядро нейрона. Говорячи про важливість ланки програм в ядрі нейрона необхідно підкреслити, що програми, які запускаються генами, беруть участь у перетворенні пам'яті з короткочасної в довготривалу. Експерименти з тваринами показали, що їх навчання вимагає синтезу нових білків в мозку протягом декількох перших хвилин тренінгу, в іншому випадку інформація в пам'яті буде втрачено [6.30].

Щоб зробити новий білок, необхідно, згідно з програмою, ділянку ДНК, що знаходиться в клітинному ядрі, скопіювати на відносно невелику рухливу молекулу, яка називається матричною РНК (мРНК). Потім ця мРНК виходить в цитоплазму клітини, де спеціальні клітинні органели зчитують закодовані в ній інструкції програми і синтезують молекули білка.

Транскрипційні фактори (CREB) - це керуючі білки, що містяться в клітинному ядрі, які шукають конкретні послідовності ДНК і зв'язуються з ними. Фактично вони є вимикачами-тригерами, які керують транскрипцією генів. При цьому активація CREB в нейроні веде до активації генів, що призводить до виробництва білків, що підсилюють синаптичну зв'язок, і перетворюють короткочасну пам'ять в довготривалу.

Було показано [6.31], що, хоч би чим були "білки пам'яті", від них не потрібно адресації до певних синапсів. Вони можуть поширитися по всій клітині, але вплинуть тільки на ті синапси, які зазнали тимчасового підвищення своєї ефективності, і підвищать силу цих зв'язків на тривалий час.

Однак сигнальну молекулу, яка подорожує з синапсу в ядро і визначає, коли слід активувати CREB і зберегти слід пам'яті, ідентифікувати не вдається. Для наближення до вирішення даного завдання можна розглянути пошук сигнальної молекули під іншим кутом зору. Для цього можна розглянути яким чином формуються зв'язки в мозку під час внутрішньоутробного розвитку. При цьому нас буде

цікавити, як гени можуть кодувати всі ті мільйони з'єднань, які виникають в мозку, який розвивається.

Цікава точка зору на вирішення цієї задачі нейробіологів, які вивчають розвиток мозку. Вони пояснюють зазначений феномен з кодування генами синапсів з точки зору накопичення або навчання системи з мільйонами підсистем - «ген-синапс» при налагодженні схеми зв'язків мозку.

Правило посилення окремих нейронних зв'язків [6.31] виглядає наступним чином: «Якщо аксон клітини А знаходиться досить близько, щоб збуджувати клітину В, і неодноразово або постійно бере участь в її збудженні, то спостерігається певний процес зростання метаболічних змін в одній або обох клітинах, що веде до збільшення ефективності А, як однієї з клітин, які збуджують В». Вивчаючи підсистеми - «ген-синапс» важливо розуміти механізми роботи молекулярної пам'яті при формуванні запам'ятовуючих структур.

Як зазначалося вище, мозок людини відбирає найбільш важливу, загальну інформацію, уникаючи свого роду «інформаційної катастрофи». За відбір інформації відповідає реакція уваги - один з механізмів усунення надмірності сенсорного потоку і придушення багатьох сенсорних входів (рис.6.16).



Рис.6.16. Схема роботи механізму усунення надмірності сенсорного потоку інформації.

Властивість вибіркості, так само як і властивість забування, дозволяють мозку не бути «затопленим» потоком сигналів, які безперервно надходять. Умовно інформаційна ємність кори головного мозку у людини дорівнює приблизно 3×10^8 біт. Якщо вважати, що в середньому інформаційний потік становить 20 біт / сек, а для зберігання 1 біта потрібно 10 нейронів, то за 70 років при тривалості активного дня 16 годин, загальне надходження інформації складе 3×10^{10} біт. Це в 100 разів більше, ніж інформаційна ємність мозку. Звідси випливає, що зберігатися в мозку може не більше 1% від загального потоку інформації [6.30].

Розглянемо процес ініціалізації утворення сліду пам'яті, який супроводжується утворенням в клітині молекули-посередника - циклічного аденозинмонофосфату (цАМФ), який "запускає" утворення білка, що зв'язується з ДНК нейрона (рис.6.17).

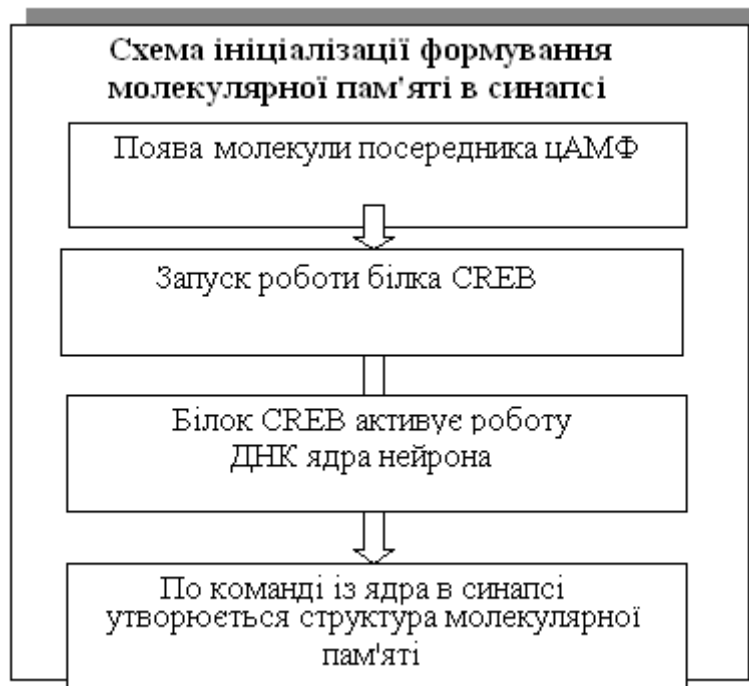


Рис.6.17. Схема ініціалізації формування молекулярної пам'яті.

Для розуміння принципів формування молекулярної довготривалої пам'яті важливо знати алгоритми запам'ятовування і вимоги до їх створення. Так, в першу чергу і з великою ефективністю зберігається нова, значуща і цікава інформація. При нейрофізіологічних дослідженнях основ пам'яті розрізняють власне механізми пам'яті і регуляторні механізми пам'яті, до яких відносяться емоції. Існує вихідна

генетична різноманітність нейронів різної спеціалізації, що виявляється лише в тій чи іншій поведінці. Іншими словами, спеціалізація нейронів носить програмний характер вже при народженні індивідуума.

Процес виходу етапів формування молекулярної пам'яті на визначений рівень є інтегральною подією з відповідним апаратом емоцій. Пам'ять є інтегральним цілим і містить апарат емоцій, який дозволяє запускати в дію той чи інший рівень, включати діяльність тих чи інших спеціалізованих нейронів.

Як показали дослідження, коли тварини навчаються виконувати якесь завдання і запам'ятовують навичку, що утворилась, синапси, відповідальні за формування сліду пам'яті, перебудовуються і посилюються в результаті процесу, що вимагає активації генів [6.32]. Формування сліду пам'яті при цьому супроводжується утворенням в клітині молекули-посередника - цАМФ.

Ця молекула в свою чергу "запускає" утворення білка, який зв'язується з ДНК нервової клітини. В результаті активізується ціла сукупність генів, відповідальних за синтез білків, які "добудовують" синапси і тим самим підвищують їх ефективність. Цей процес і лежить в основі консолідації сліду пам'яті. "Запускаючий" його білок CREB зв'язується з цАМФ-залежним елементом. Чим вище рівень CREB в нейроні, тим швидше відбувається консолідація пам'яті. Циклічний АМФ в клітині руйнується ферментом фосфодіестеразою (ФДЕ), а пригнічення активності фосфодіестерази призводить до збільшення часу доступності CREB, а значить, і ефективності і швидкості процесу формування пам'яті.

Надлишок калію (K^+) всередині і натрію (Na^+) зовні мембрани нейрона виникає не сам собою, а його створює спеціальний білковий комплекс - Na^+ , K^+ - АТФаза, або натрієвий насос, який за рахунок енергії АТФ жене іони калію всередину, а натрію - назовні.

Електростимуляція нерва викликає зміну знака потенціалу: іони натрію спрямовуються всередину. Входять вони не де попало, а через інші спеціальні канали. Якщо хоча б на невеликій ділянці мембрани потенціал досягає значення 50 мВ, мембрана відкривається для Na^+ , і значення потенціалу майже миттєво змінюється до

+30 мВ. Потім проникність мембрани знову падає, і насос відновлює статус-кво; вся процедура займає близько мілісекунди [6.32].

Цей стрибок називається потенціалом дії. Мембрана аксона влаштована таким чином, що ця "хвиля" направлено поширюється по ній з високою швидкістю: зміна потенціалу на одній маленькій ділянці розряджає сусідній нейрон. У хребетних тварин з метою збільшення швидкості передачі зроблено ще одне вдосконалення: аксон покритий ізолюючою мієліновою оболонкою, в якій є розриви (так звані перехоплення Ранв'є), і збудження переноситься великими стрибками, від розриву до розриву.

6.10. Вивчення процесу передачі сигналів нейронами за допомогою синаптичних мереж.

Від клітини до клітини сигнал передається способом, який схематик не може навіть уявити. Місце контакту нейронів представляється синаптичною структурою: пресинаптична мембрана (клітини-передавача), постсинаптична мембрана (клітини-приймача) і щілина між ними шириною близько 20 нм. Коли в нервовому закінченні прибуває черговий імпульс, пресинаптична мембрана деполяризується і стає проникною для іонів кальцію. Їх входження запускає наступний етап.

Якщо розглядати особливості роботи хімічних синапсів, то можна констатувати, що це складні електротехнічні пристрої, які мають корисні властивості, серед яких односпрямованість передачі і здатність з однаковою силою передавати сильний і слабкий сигнали.

До пресинаптичної мембрани зсередини причалюють бульбашки зі спеціальною речовиною - нейромедіатором. Ці речовини називають нейротрансмітерами. Бульбашки відкриваються назовні, і медіатор вихлюпується в синаптичну щілину. На постсинаптичній мембрані є рецептори, на які сідають молекули медіатора. Після цього вже в постсинаптичній мембрані відкриваються канали, і вона деполяризується або гіперполяризується - залежно від того, які канали повинні відкриватися.

У збудливих синапсах відкриваються калієві і натрієві канали, що дозволяє іонам натрію входити в клітину, а іонам натрію виходити при деполяризації мембрани. У гальмівних синапсах відкриваються канали для іонів калію і хлору, що

призводить до гіперполяризації. Дифузія медіатора через синаптичну щілину займає близько 0,5 мс.

Крім хімічних синапсів, описаних вище, є і електричні. Імпульс проходить по такому синапсу безпосередньо, без хімічних посередників, оскільки ширина синаптичної щілини там всього 2 нм (в хімічному синапсі - в десять разів більше). Однак у хребетних тварин основну роль все ж відіграють хімічні синапси [6.32].

6.11. Вивчення ролі нуклеїнових кислот як креслярської документації при синаптичних побудовах молекулярної пам'яті.

У людини і всіх ядерних організмів, одна матрична РНК, як правило кодує тільки один білок. Гени ж бактерій (а також їх вірусів - бактеріофагів) розташовані послідовно і організовані в оперони. Оперон— одиниця зчитування генетичної інформації (ділянка ДНК, що складається із зчеплених структурних генів (цистронів): промотора, гена-оператора, гена-термінатора. У нуклеотидній послідовності останніх заковано одну (багатоклітинні організми) чи кілька (одноклітинні організми) молекул мРНК, які детермінують (визначають) синтез певних білків (ферментів).

Розглянемо, що дає простий і зручний блоковий спосіб формування інформаційних інструкцій. Всі потрібні в конкретний момент гени включаються одночасно, одним сигналом, копіюються на одну РНК і потім знову одночасно синтезується весь набір потрібних білків.

Наші еукаріотичні гени регулюють складні каскади біохімічних реакцій, відгукуються на сигнали ззовні і на власні потреби клітини, причому не за принципом "так чи ні" а плавно змінюючи активність. Часто мРНК включає в себе "інструкцію" наскільки інтенсивно повинен синтезуватися білок.

Характерна особливість еукаріотичної матричної РНК містити інтрони - довгі вставки, що не кодують жодної ділянку білка. Інтрони треба вирізати перед тим, як синтезувати білок, а кодуючі ділянки - екзони зшити в рамках процесу сплайсингу.

Розглянемо роботу ДНК як запуск програм в біохімічній машині, яка функціонує всередині нейронів на основі системи формування довготривалої пам'яті в метасистемі «синапс-ядро клітини нейрона» (рис.6.18).

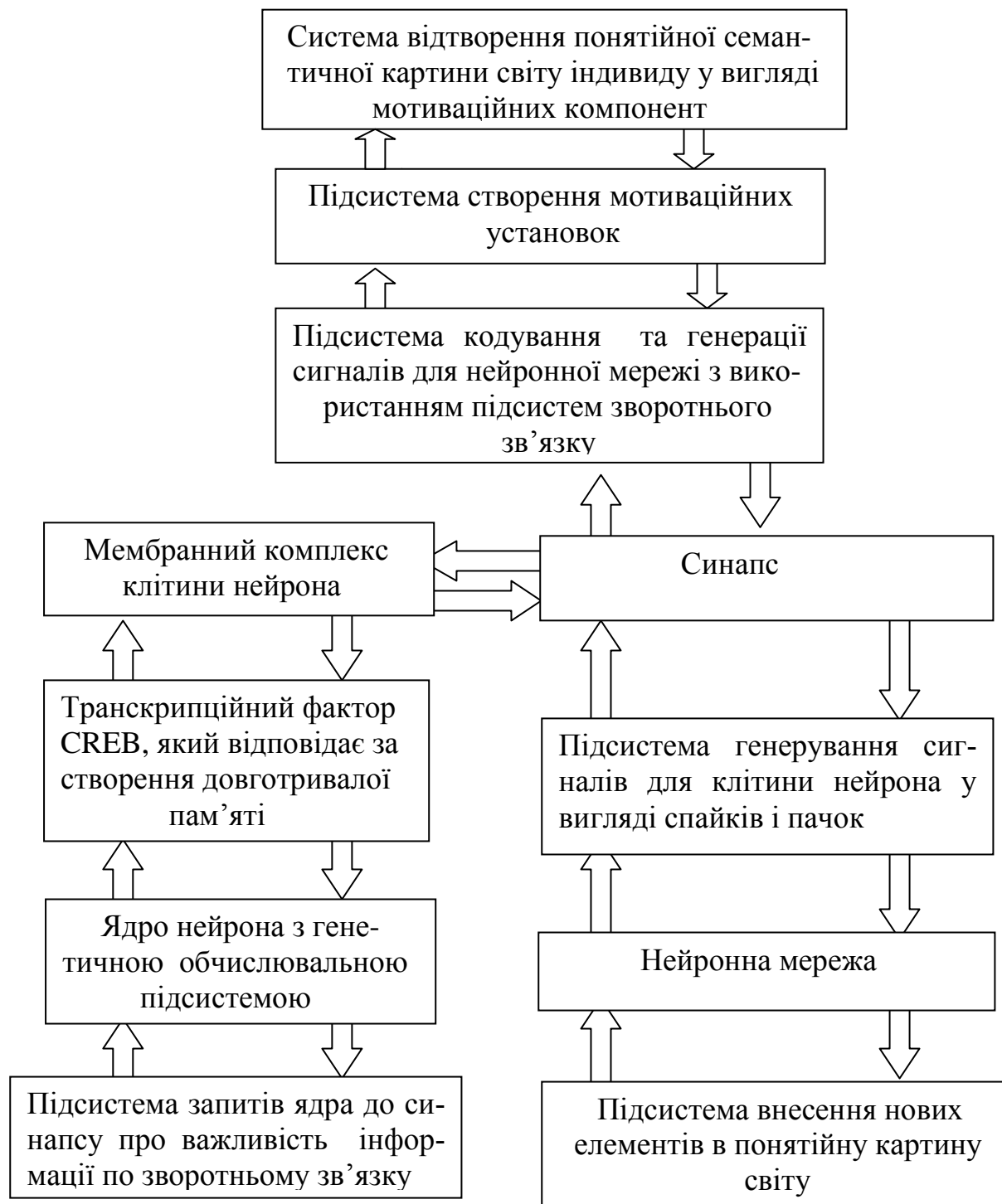


Рис. 6.18. Схема роботи системи формування довготривалої пам'яті в метасистемі "синапс-ядро клітини нейрона" за допомогою біохімічної обчислювальної машини.

Протяжні некодуючі послідовності еукаріотичного генома раніше називали паразитичною ДНК, маючи на увазі, що вона нікчемна для клітини і передається з покоління в покоління лише за компанію з дійсно потрібними ділянками. Але тепер

уже ясно, що ці ілюстрації до нуклеотидному тексту для чогось потрібні, хоча виконані в надзвичайно абстрактній манері. Наприклад, повторювані послідовності ДНК - не просто авангардне розфарбування в смужку. Генетична інформація не висічена в камені і не нанесена чорнилом на пергамент, а являє собою послідовність мономерів в біополімерах.

Необхідно підкреслити, що РНК є молекулою-посередником, а її нуклеотидний склад сильно відрізняється від складу ДНК. При цьому нуклеотидний склад РНК подібний у різних видів, хоча їх ДНК помітно різняться. Крім матричних РНК є ще два важливі різновиди - рибосомні (рРНК) і транспортні (тРНК).

Для того, щоб зрозуміти принципи роботи біохімічної машини всередині нейрона за програмами генів, необхідно розглянути шлях проходження сигналу від постановки задачі (мотиваційна установка) для створення структур довготривалої пам'яті в синапсах. В основі роботи зазначених програм лежать дуже важливі властивості білків- поява потрібного білка в потрібному місці по складній ієрархії програм.

Білки, будучи набагато більш потужними каталізаторами, відразу ж після своєї появи беруть на себе керування процесами в клітині і допомагають відтворити ДНК, яка стає тим "жорстким диском", де записується вся клітинна інформація.

Тут необхідно ще раз підкреслити, що зазначений вище термін - складна ієрархія програм і є результатом, здатним підтримувати інтелектуальні властивості синаптичних і нейронних мереж при роботі молекулярних запам'ятовуючих структур.

Необхідно особливо виділити **головну властивість білків, які в якості ферментів-каталізаторів виконують функції керування в клітині знову ж за програмами ДНК.** Більше того, білки дозволяють відновлювати і саму ДНК. При цьому ДНК, як вказувалося вище представляється своєрідним жорстким диском, що запускає роботу всієї субнаносистеми у вигляді ієрархії від клітини до організму.

Білки плавають у цитоплазмі або проникають в ядро, вбудовуються в мембрану або тільки прилипають до неї з одного боку, утворюють разом з іншими молекулами органиели або працюють поодиноці, збираються в видимі оком агрегати або за-

лишаються крихтими частинками. Система побудови білків кожного виду спочатку розбере його на деталі - амінокислоти, а вже потім збере з них конструкцію по заданій інструкції програми.

Молекули білків існують в клітинах короткочасно, лише деякі функціонують впродовж всього життя. Більшість білків працює кілька днів, а деякі кілька годин. Після виконання своїх функцій вони розпадаються, а замість них поступають інші такі ж білки згідно з інструкціями конкретних генів (рис.6.19).

Народившись і отримавши додаткові компоненти, білки за програмою виконують свої функції (рис. 6.19).



Рис.6.19. Схема роботи механізму забезпечення білками функцій нейрона.

При цьому проявляються основні властивості білків- поява потрібного білка в необхідному місці згідно складної схеми програм.

6.12. Дослідження принципів роботи мозку як обчислювального пристрою з паралельною обробкою даних.

Процес надходження сигналу в синапс починається в результаті відкриття в пресинаптичній мембрані нейрона каналів для іонів натрію і калію. В результаті виникає потенціал дії (нервовий імпульс). Цей потенціал поширюється по аксону до

його закінчення зі швидкістю від 0,1 м/с до 100 м/с (чим товще аксон, тим вище швидкість проведення). Процеси, що обумовлюють зміну стану мембрани нейрона, розгортаються в межах 10-20 хв після імпульсації.

Коли потенціал дії досягає закінчення аксона, активується ще один тип іонних каналів, що залежить від різниці потенціалів, - кальцієві канали. По ним кальцій входить всередину аксона, що призводить до мобілізації бульбашок з нейромедіатором, які наближаються до пресинаптичної мембрани, зливаються з нею і вивільняють нейромедіатор в синапс (рис.6.20).

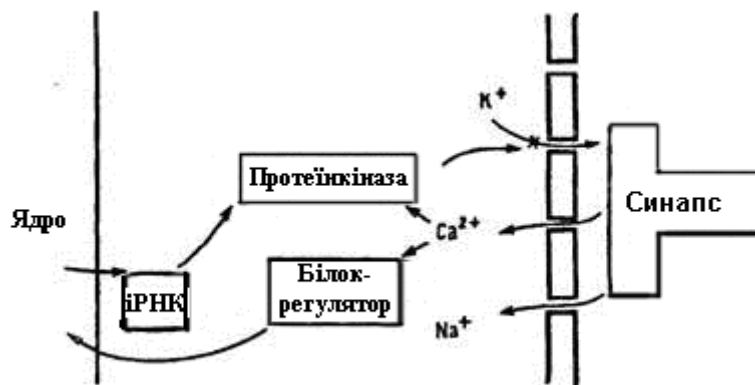


Рис.6.20. Схема входження кальцію в аксон.

На даному малюнку можна простежити два контури керування іонними кальцієвими каналами: короткостроковий (медіатор—>Ca²⁺ — протеїнкіназа-> інактивація калієвого каналу) і довгостроковий (медіатор—>Ca²⁺ — білок-регулятор-> ядро-> іРНК-> синтез протеїнкінази -> посилення блокади калієвих каналів).

Для розуміння механізму формування нервового імпульсу до його надходження в досліджуваний нейрон розглянемо принцип формування образу в мозку в разі, коли ми беремо в руку олівець. З первинної зорової кори інформація по аксонах надходить в асоціативну зорову кору (рис.6.21). Світло, відбите від олівця, фокусується в очі кришталіком і спрямовується на сітківку, де виникає зображення олівця; воно сприймається відповідними клітинами, від яких сигнал йде в основні чутливі передаючі ядра головного мозку, розташовані в таламусі (зоровому горбі), переважно в тій його частині, яку називають латеральним колінчастим тілом. Там активуються численні нейрони, які реагують на розподіл світла і темряви.

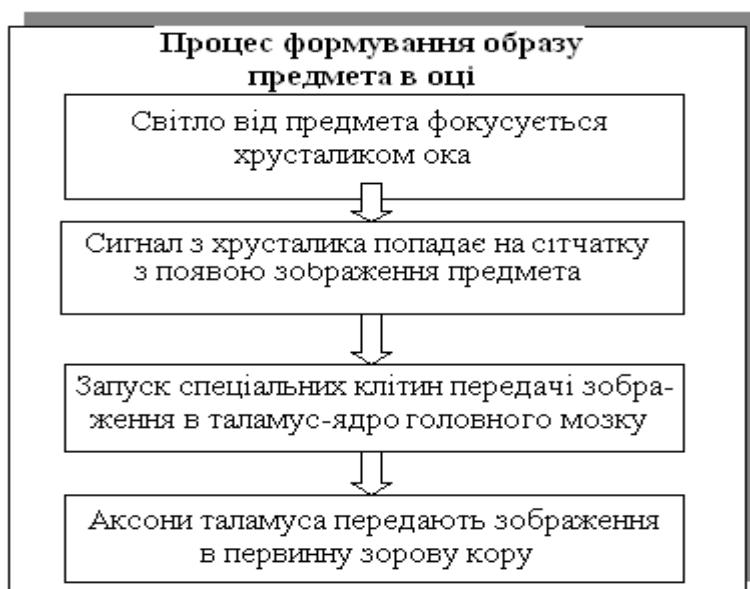


Рис.6.21. Схема процесу формування образу предмета в очі.

Аксони нейронів латерального колінчастого тіла йдуть до первинної зорової кори, розташованої в потиличній долі великих півкуль. З первинної зорової кори інформація по аксонах надходить в асоціативну зорову кору, де відбувається розпізнавання образів (рис.6.22).



Рис.6.22. Розпізнавання образу предмета в асоціативній корі.

Імпульси, що прийшли з таламуса в цю частину кори, перетворюються в ній у складну послідовність розрядів коркових нейронів, одні з яких реагують на границю між олівцем і столом, інші - на кути в зображенні олівця і т.д. Розпізнавання в цій частині кори засноване на попередньо накопичених знаннях про зовнішні обриси предметів.

Планування руху (тобто взяття олівця) відбувається в корі лобових часток великих півкуль. У цій же області кори розташовані рухові нейрони, які віддають команди м'язам руки і пальців. Наближення руки до олівця контролюється зоровою системою і інтерорецепторами, що сприймають положення м'язів і суглобів, інформація від яких надходить в ЦНС. Коли ми беремо олівець в руку, рецептори в кінчиках пальців, що сприймають тиск, повідомляють, чи добре пальці обхопили олівець і яким має бути зусилля, щоб його утримати. Якщо ми захочемо написати олівцем своє ім'я, буде потрібно активація іншої інформації, яка зберігається в мозку, що забезпечує це більш складний рух, а зоровий контроль сприятиме підвищенню його точності.

Для розуміння процесів запам'ятовування і вибору об'єкта формування запам'ятовуючих структур в [5.32] були досліджені пріоноподібні білки СПЕВ. Необхідно відзначити, що процес запам'ятовування полягає в тому, що в мозку утворюється якийсь еквівалент отриманого зовнішнього впливу у вигляді образу, переживання або поняття. При цьому важливо знати матеріальний носій такого явища. Кожний вплив на мозок закарбовується у вигляді певної зміни деяких білків, які містяться в нервових клітинах - нейронах.

Однак молекули білків існують в клітинах, як правило, короткочасно: лише деякі - все наше життя, а більшість - дні, години або навіть хвилини. Вони розпадаються, виконавши своє завдання в життєвому процесі, а на зміну їм виробляються інші, згідно з інструкціями тих чи інших генів. І якщо тільки згаданий "спогад" не відображено в генах (і в їх інструкціях), то нові білки, на відміну від тих, що розпалися, вже не будуть їх утримувати.

Однак припустити, що спогади вкарбовуються в генах, ми не можемо. Бо тоді виникає дуже складне труднощі. Якби спогади нашого життя запам'ятовувалися в

генах, то вони передавалися б у спадок нашим нащадкам з пам'яттю батьків. Природа постаралася нас від цього позбавити. Вона придумала інший спосіб запам'ятовувати.

Цей спосіб - сліди, що зберігаються в нейронних ланцюгах. Серед трильйонів точок з'єднання між нейронами, що утворюють неймовірно складну мережу контактів, будь-який сигнал, запущений в таку мережу, може йти по ній мільярдами мільярдів різних шляхів.

Процес формування пам'яті визначає сигнал, що проходить по якомусь шляху, запалює по дорозі всі пройдені ним нейрони і на карті мозку спалахне слід цього пробігу. У нейрології є такий термін: кажуть, що проходження сигналу по нейрону "запалює" цей нейрон, нейрон "спалахує". Якщо якийсь певний сигнал стрімко пробіг по якомусь замкнутому шляху і запалив по дорозі всі пройдені ним нейрони, на карті мозку спалахне слід цього пробігу; інший сигнал пройде по іншим нейронам тієї ж загальної мережі і запалить свій слід і так далі. Кожен такий слід є мозковим еквівалентом того впливу (образа, звуку, переживання або поняття), який породив первинний сигнал [6.33].

Процес додання сліду в нейронній мережі статусу - згадування, тобто отримати можливість знову викликати в свідомості цю інформацію, потрібно якимось чином "записати" цей слід за допомогою синапсів - проміжків між точками з'єднання двох різних нейронів.

Для того щоб зберегти цей слід у вигляді "спогаду", тобто того, що можна потім знову викликати в свідомості, потрібно, як вказувалось вище, якимось чином "записати" цей слід. При кожному проходженні даного сигналу по своїй системі нейронів ті - і тільки ті - синапси, які з'єднують ці нейрони в єдиний "слід", стають, грубо кажучи, більш "провідними" [6.33].

Багаторазове проходження одного і того ж сигналу у вигляді наказу-думки створює на карті мозку невелику "підкарту" змінених синапсів. Сукупність таких "підкарт" утворює нашу пам'ять (рис.6.23). Процес "згадування" того чи іншого "спогаду" - це повторне запалювання відповідної йому "підкарти" [6.33].



Рис.6.23. Схема формування підкарти пам'яті.

У цьому процесі не все ще ясно, але можна уявити собі, що тільки-но "вольовий імпульс", що викликає спогад, запалює кілька перших нейронів даної підкарти, як далі сигнал вже "сам собою" біжить по самому легкому шляху, тобто через більш провідні синапси, запалюючи всю "підкарту". Подібно до того, як при написанні листа в системі E-mail, варто написати кілька перших букв електронної адреси якогось адресата, і раптово "сама собою" спалахує вся ця адреса. (Зауважимо, що наше унікальне "Я" - це перш за все наша унікальна пам'ять, воно складається, по суті, з усіх наших "спогадів" в найширшому сенсі цього слова, і тому сукупність всіх таких синаптичних "підкарт" можна назвати нашим "синаптичним Я".)

В [5.32] було показано, що обробка будь-якого дендрита - "приймача" на даному нейроні сигналів з іншого нейрона - серотоніном (речовиною-посередником) викликає бурхливе утворення в ньому - і тільки в ньому - особливої мітки: молекули СПЕВ, яка включає виробництво потрібних білків.

Оскільки білки розпадаються кожні кілька годин, молекула СПЕВ здатна забезпечувати довготривалу пам'ять, тобто довготривале збереження придбаних даним дендритом змін за рахунок особливих білків пріонів. Пріони на відміну від всіх

інших білків, мають дві стійкі просторові конфігурації - розчинну і нерозчинну. Цю свою другу форму вони можуть зберігати роками. Інша відмінна риса будь-якого пріону полягає в тому, що, перебуваючи в нерозчинній формі і увійшовши в контакт із собою подібними, але в розчинній формі, він якимось чином переводить їх теж в нерозчинну, як би "заражає" всіх зустрічних собі подібних "нерозчинністю". Саме це лежить в основі пріонів природи коров'ячого сказу ": випадково виник" нерозчинний пріон "швидко" заражає "безліч собі подібних, утворюючи в мозку тварини цілі скупчення нерозчинних білків, які душать цілі ділянки мозку.

Після вивчення білка СПЕВ було виявлено, що одна його частина схожа на відомий пріон [6.24]. Було показано, що білок СПЕВ дійсно діє як типовий пріон. При цьому активно виявилася саме його нерозчинна форма. Нервовий сигнал, що приходить в певний дендрит, переводить невелику кількість молекул, що знаходяться там молекул СПЕВ в активну форму, ті переводять в стійку активну форму інші молекули СПЕВ.

6.13. Розробка запам'ятовуючого пристрою з надвисокою щільністю запису інформації на основі синтезу ДНК.

Значний практичний інтерес для створення технологій формування запам'ятовуючих пристроїв становлять можливості запису, читання та збереження інформації з використанням високополімерних сполук, зокрема ДНК та РНК.

Хоча теоретична щільність ДНК-запису, що досягається за допомогою подібної технології, становить 5,5 петабіт на кубічний міліметр, проте практичне використання цього методу сильно обмежене його громіздкістю, тривалістю циклу запис / читання і вартістю.

Враховуючи, що вартість розшифровки ДНК щорічно падає приблизно в 5-15 разів - набагато швидше, ніж вартість цифрового електронно-оптичного мегабайта, виникають значні можливості аналізу та синтезу ДНК. Такий підхід до використання можливостей вказаного вище методу дозволяє ефективно спрощувати подальшу розшифровку і корекцію помилок, здійснених за допомогою автоматизованої полімеразно-ланцюгової реакції і паралельних ДНК-секвенаторів новітнього покоління. Секвенатор ДНК - це пристрій, за допомогою якого виконується автоматизоване ви-

значення послідовності нуклеотидів (елементів) в ланцюгу ДНК. Малі фрагменти ДНК-ланцюгів після корегування помилок за допомогою «дзеркальних» ланцюжків та читання з'єднують в масив даних відповідно до адресних міток, нанесених на вказаних фрагментах.

Для кодування інформації в ДНК підходить той же спосіб, що і для перетворення інформації перед завантаженням на жорсткий диск. Але якщо для зашифрування даних для комп'ютера використовуються нулі і одиниці, то в ДНК задіяні чотири нуклеотиди, що є основою для її побудови: А, С, Т і G. Кожному з них відповідає певна послідовність компонентів, які за допомогою хімічних реакцій шикуються в певному порядку, утворюючи ланцюг. А при декодуванні даних застосовується спектрометр для зчитування послідовності ДНК. Найновішим доказом ефективності молекулярних носіїв даних є створення ДНК-дисків, розміщених в сферах з діоксиду кремнію - речовини, яка може зберігатися протягом століть.

На сьогодні створено лінійку пристроїв для запам'ятовування інформації на основі ДНК. Зокрема для запису, зберігання та перезапису даних можуть бути використані гібридні технології, а саме, з використанням синтетичних нуклеотидів та нуклеотидів та ферментів з живих клітин.

В [6.34] пропонується запам'ятовуючий пристрій на основі ДНК, який має блок формалізованого представлення ДНК в цифровому вигляді даних, секвенатор ДНК та блок з набором ферментів для розрізання та зшивання нуклеотидів ДНК.

В штучну ДНК записували п'ять файлів загальним обсягом 5,2 мегабіта. Використовуючи носієм пам'яті короткі одноланцюжкові ДНК було записано на масив таких ДНК п'ять різних файлів для представлення даних через послідовність азотистих основ ДНК. Дані кодувалися в чотирьох блоках по 25 нуклеотидів. У 17 нуклеотидах кодувалися адресні мітки, необхідні для збирання даних в вихідний файловий масив.

Кодування відбувалося в три етапи. Двійковий код, в якому були представлені дані, спочатку конвертувався на комп'ютері в трійчастий код, за допомогою якого восьмибітні блоки даних представлялися у вигляді послідовності з п'яти потрібних чисел, або тритів (0,1,2). Далі блокова послідовність тритів конвертувалась в код з

трьох нуклеотидів. Трійкове кодування дозволяло не тільки стиснути дані, але і зменшити ймовірність помилок при подальшому зчитуванні ДНК і реконструкції заданого масиву [6.35].

В [6.36] описано запам'ятовуючий пристрій на основі ДНК, який має блок формалізованого представлення ДНК в цифровому вигляді даних, секвенатор ДНК та блок з набором ферментів для розрізання та зшивання нуклеотидів ДНК.

Вказаний пристрій дозволяє записувати і стирати інформацію, включає комбінацію двох клонованих вірусних ензимів - інтегрази і ексцизионази, - запозичених у бактеріофага Vxb1 (вірусу, що використовує для реплікації свого генома ДНК бактерій). Запис інформації здійснювався на ДНК кишкових паличок. Використовувався алгоритм «адресації даних за допомогою рекомбінази» в складі модуля RAD - recombinaase addressable data module. За допомогою вказаного пристрою можна модифікувати ділянки ДНК - записувати, стирати і знову записувати біти на одних і тих же хромосомах.

В [6.37] представлено запам'ятовуючий пристрій на основі ДНК, який має блок формалізованого представлення ДНК в цифровому вигляді даних, секвенатор ДНК та блок з набором ферментів для розрізання та зшивання нуклеотидів ДНК.

У вказаному пристрої для кодування 5,27-мегабітного масиву було використано штучно синтезовані послідовності нуклеотидів (олігонуклеотидів) у вигляді 96-бітного блоку даних (96 нуклеотидів), 19-бітову адресу, за якою визначалося місце блоку в загальному масиві (19 нуклеотидів), і 22-бітові технічні послідовності основ.

В даній роботі перед здобувачем була поставлена задача створити такий пристрій, в якому, через введення нових елементів було б можливо реалізувати синтез ДНК з використанням РНК для передачі інформації від джерела інформації на місце постійного зберігання інформації в ДНК за допомогою РНК-залежної ДНК-полімерази, що дозволить розширити функціональні можливості пристрою, що пропонується[6.38].

Для розв'язання поставленої задачі необхідно було створити запам'ятовуючий пристрій з надвисокою щільністю запису інформації, який включає в себе блок формалізованого представлення ДНК в цифровому вигляді даних, секвенатор ДНК

та блок з набором ферментів для розрізання та зшивання нуклеотидів ДНК, набір нуклеотидів РНК для передачі інформації від джерела інформації на місце постійного зберігання інформації в ДНК за допомогою РНК-залежної ДНК-полімерази [6.38].

На фіг.6.24 представлена структурна схема запам'ятовуючого пристрою надвисокої щільності запису інформації з використанням механізму запису на ДНК.

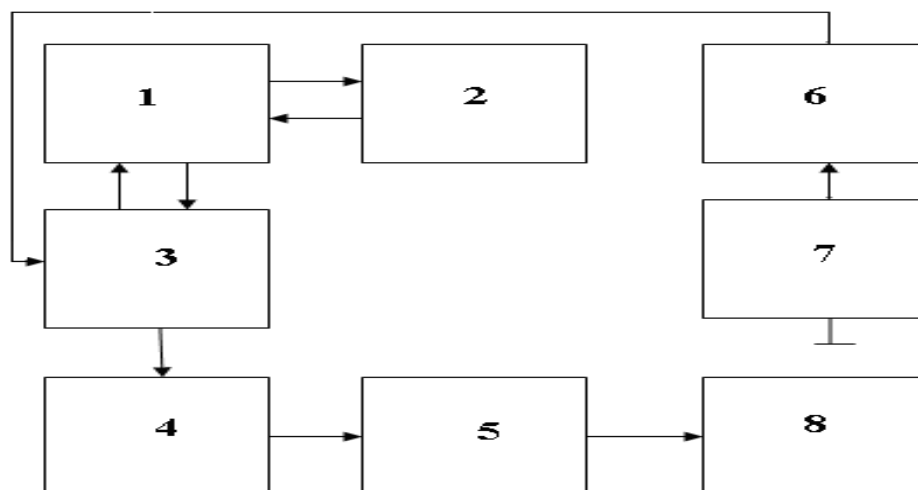


Рис.6.24. Структурна схема запам'ятовуючого пристрою надвисокої щільності запису інформації з використанням механізму запису на ДНК.

Структурна схема запам'ятовуючого пристрою з надвисокою щільністю запису інформації містить об'єднану рідинну систему ДНК 1 та РНК 2, вихід якої з'єднаний із входом блоку детекції 3 сенсорних МДН-структур, вихід якого зв'язаний з входом підсилювача струму 4, вихід якого з'єднаний з входом аналогово-цифрового перетворювача 5, інформація від якого в цифровому вигляді надходить в комп'ютерну систему 8. Другий вихід рідинних систем 1 та 2, з'єднаний з входом джерела напруги зсуву 6, вихід якого зв'язаний з входом генератора шуму 7.

Рідинні системи ДНК 1 та РНК 2 мають в своєму складі підсистему детекції 3 на основі МДН-сенсорів, чутливих до викидів іонів водню в розчин. Підсистема детекції має чотири планарні матриці, на поверхні яких розміщено від 1 до N сенсорів, містить джерело напруги зсуву 6 і генератор шуму 7. При цьому в якості сенсора використовують структуру з можливістю формування режиму стохастичного резонансу.

нансу, яка виконана на основі МДН-структури, що дозволяє забезпечити роботу сенсора посередині ділянки бістабільності на його ВАХ за рахунок зміщення робочої точки МДН-структури, для чого один вихід джерела зсуву 6 підключений до катода пристрою, а інший вихід підключений до генератора шуму, при цьому анод МДН-структури є виходом сенсора і підключений до одного з N входів підсилювача струму 4, вихід якого підключений до входу аналого-цифрового перетворювача 5, пов'язаного зі входом комп'ютерної системи 8. На рис.6.25 приведена функціональна схема, яка забезпечує умови виникнення стохастичного резонансу в МДН-структурі.

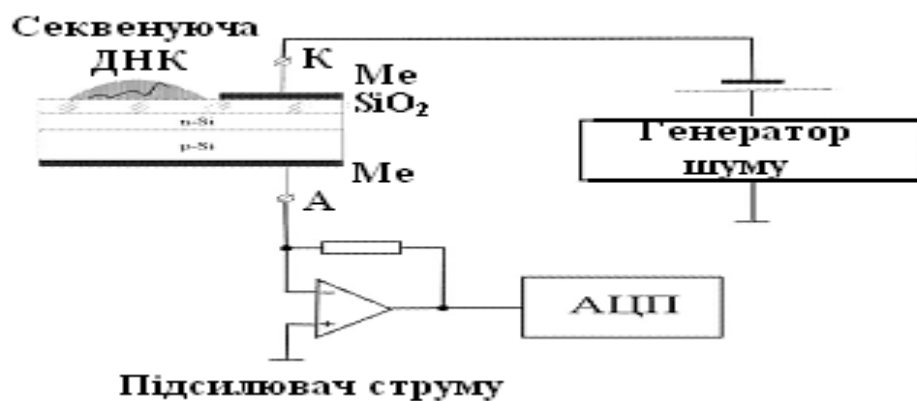


Рис.6.25. Функціональна схема, яка забезпечує умови виникнення стохастичного резонансу в МДН-структурі.

При цьому МДН-структура складається з багатошарової конструкції, що включає з'єднаний з анодом перший металевий контакт, який розміщений на нижньому шарі p-Si, верхня поверхня якого з'єднана з нижньою поверхнею шару n-Si, верхня поверхня якого покрита шаром діелектрика, що складається з алмазоподібної плівки, на верхній поверхні якого утворена робоча зона для іммобілізації фрагментів ДНК.

Підсилювач струму 4 представлений мікросхемою MAX4209 фірми MAXIM Integrated; АЦП 5— представлений мікросхемою MAX11905 фірми MAXIM Integrated; джерело напруги зсуву 6 виконано на основі мікросхеми 544УД12У3 фірми "Західприлад"; генератор шуму 7 представлений операційним підсилювачем КР140УД1208 та підсилювачем потужності К174ХА10 фірми "Західприлад".

При роботі пристрою необхідно приготувати чотири види розчинів для полімеризації фрагментів ДНК (по числу видів нуклеотидів: аденіну, тиміну, гуаніну, цитозину), при цьому кожен розчин містить, як мінімум, всі чотири види нуклеотидів, причому концентрація одного з нуклеотидів менше концентрації трьох інших. Коли в якомусь із розчинів концентрація будь-якого виду нуклеотиду знижена, то в трьох інших розчинах концентрація цього виду нуклеотиду має нормальне значення. Таким чином, в кожному з підготовлених чотирьох розчинів знижена концентрація або нуклеотиду аденіну, або тиміну, або гуаніну, або ж цитозину.

Фрагменти ДНК, що секвенуються, за допомогою рідинної системи з використанням автоматизованої піпетки поміщають на поверхню чотирьох напівпровідникових сенсорів - структур «метал-діелектрик-напівпровідник», на поверхню діелектричного шару, з іммобілізацією на ньому в заздалегідь нанесені розчини чотирьох видів, для проведення реакції полімеризації ДНК.

За допомогою рідинної системи, описаної вище, в розчин додають молекули ДНК полімерази.

Проводять робочий цикл секвенування фрагмента ДНК. При цьому здійснюють детектування моменту приєднання нуклеотиду до зростаючого ланцюга ДНК за рахунок вимірювання сигналу від кожного сенсора, виконаного на МДН-структурі з можливістю реєстрації або зміни концентрації іонів водню на фрагменті ДНК, що полімеризується в розчині полімеризації, в режимі стохастичного резонансу. Режим стохастичного резонансу забезпечують вибором робочої точки МДН-структури сенсора посередині ділянки бістабільності і введенням сигналу шуму від генератора шуму 7 на катод МДН-структури.

Реєструють чотири сигнали з виходів підсилювачів МДН-сенсорів, розміщених на чотирьох матрицях, і проводять обробку даних за допомогою комп'ютера. При цьому визначають моменти затримки сигналу при включенні кожного виду нуклеотиду в молекулу ДНК на кожному окремому сенсорі.

е) Відновлюють послідовність нуклеотидів в ДНК, що секвенується шляхом поєднання отриманих даних про розташування нуклеотидів зі зниженою концентрацією, в кожному з чотирьох розчинів кожного сенсора на чотирьох матрицях.

Реєстрацію факту розділення зарядів, зокрема реєстрацію виділення іона водню в розчин при приєднанні ДНК- полімеразою чергового нуклеотиду здійснюють за допомогою вимірювання провідності розчину при проведенні в ньому реакції полімеризації ДНК. Реєстрацію факту виділення іона водню в розчин здійснюють за допомогою напівпровідникового сенсора, що представляє собою МДН-структуру.

Записані в пам'ять комп'ютера чотири сигнали-циклограми (по одному від кожного з чотирьох МДН-структур) матимуть відмінності у вигляді затримок (відсутність зміни сигналу) в ті моменти часу, коли молекула полімерази ДНК у відповідному розчині, дійшовши до того фрагмента ДНК, концентрація комплементарного нуклеотиду якого в розчині знижена, чекатиме його підходу з розчину, для вбудовування у фрагмент ДНК. Реконструкцію інформаційної послідовності секвенуючої ДНК по затримкам в ході реакції полімеризації фрагментів ДНК здійснюють наступним чином.

Після запису реалізацій зміни провідності по часу всіх чотирьох розчинів проводять порівняння реалізацій шляхом вирівнювання початку реалізацій між собою і виявлення моментів затримок в появі сигналів зміни провідності того чи іншого розчину. Зазначені затримки (або ж фази відсутності) зміни сигналу провідності даного розчину будуть вказувати на наявність в даному місці в інформаційній послідовності секвенуючої ДНК того нуклеотиду, концентрація якого істотно знижена в порівнянні з іншими в цьому розчині. Для підвищення достовірності реконструкції ДНК-послідовності вказаний досвід необхідно повторити з кратністю, пропорційній необхідному ступеню достовірності результату секвенування.

Потім в рідинну систему РНК 2, що містить нуклеотиди: аденін, урацил, гуанін, цитозин додають розчин РНК-залежної ДНК-полімерази. В рідинній системі РНК 2 відбувається синтез ДНК на матриці РНК, що і є ефектом реалізації запам'ятовуючого пристрою з надвисокою щільністю запису інформації.

В результаті ми отримуємо ефект запам'ятовування за допомогою молекулярної пам'яті, тобто запропонований пристрій дозволяє запам'ятовувати та передавати отриману інформацію на місце постійного зберігання інформації в ДНК, а саме че-

рез введення набору нуклеотидів РНК для передачі отриманого досвіду на місце постійного зберігання інформації в ДНК та РНК-залежної ДНК-полімерази.

Відповідно до експериментальних даних, довготривала пам'ять може бути результатом виникнення нових синапсів [6.39-6.41] які, в свою чергу, фіксуються по зворотньому зв'язку в ДНК.

Це підтверджує, що всякий раз при заучуванні нового матеріалу в мозку виникають фізичні зміни. Після того, як були відкриті хімічні процеси, що лежать в основі запам'ятовування, досліджувались механізми запам'ятовування за участю ДНК. Оскільки ДНК містить пам'ять для розвитку організму, а також для його функціонування при навчанні, є дуже важливим дослідження можливостей ДНК, РНК та білків в процесі передачі набутого досвіду на місце постійного зберігання інформації в ДНК за допомогою механізмів, реалізованих через введення набору нуклеотидів РНК для передачі отриманого досвіду на місце постійного зберігання інформації в ДНК та РНК-залежної ДНК-полімерази.

Інструкції для синтезу білка, що переносяться молекулою РНК, укладені в специфічній послідовності органічних основ, приєднаних до остова молекули, оскільки саме вони служать матрицями для синтезу білків. Різна послідовність призводить до синтезу різних білків. Можна стверджувати, що ця послідовність змінюється в результаті досвіду, набутого при навчанні.

6.14. Можливості молекулярних структур нуклеїнових кислот та білків для створення біокомп'ютера.

Можливості молекулярних структур при обробці та збереженні інформації можуть бути використані при створенні біокомп'ютера. В якості транзисторів можна використовувати транскриптори – набори різних ферментів, які працюють за руху руху полімерази РНК вздовж молекули ДНК. Керуючи рухом потоку РНК, транскриптор може реалізувати біологічний еквівалент логічних 1 і 0. Вихідними даними для обробки біологічним комп'ютером є різноманітні фізичні і хімічні сигнали, що виникають всередині штучної клітини внаслідок впливу на неї зовнішніми електричними та хімічними чинниками. Транскриптори також можуть служити і для посилення сигналів, подібно до того, як звичайні транзистори в електроніці викори-

стовуються для посилення сигналів. Така функція транскриптора може використовуватися для посилення генів, які запускають вироблення білків.

При дослідженні елементів ДНК як елементів мікро- і наносхем було важливо дослідити можливості структур ДНК обробляти фізичні сигнали, зокрема проводити струм, реагувати на напругу та польовий вплив. Були проведені експерименти по вивченню випрямляючих властивостей ДНК та отриманні залежностей проводити струм при прикладанні напруги між підкладкою та вістрям СТЛ. На рис.6.26 приведена залежність сили тунельного струму через молекулярну структуру ДНК від напруги між підкладкою та вістрям СТЛ. На рис.6.27 приведена залежність сили тунельного струму через комплексну сполуку ДНК-бета-каротин від напруги між підкладкою та вістрям СТЛ.

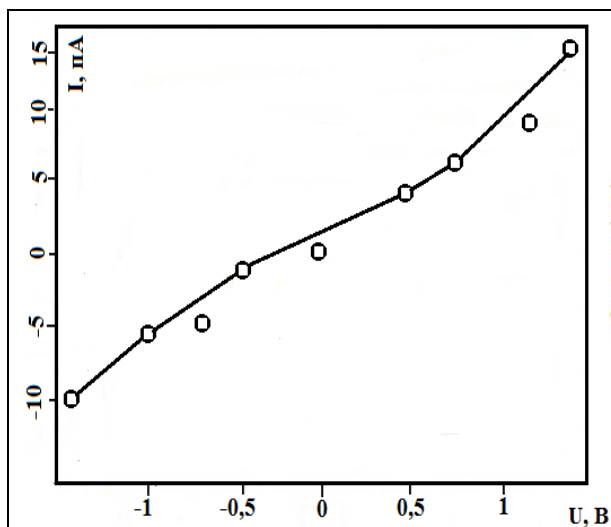


Рис.6.26. Залежність сили тунельного струму через молекулярну структуру ДНК від величини напруги між підкладкою та вістрям СТЛ.

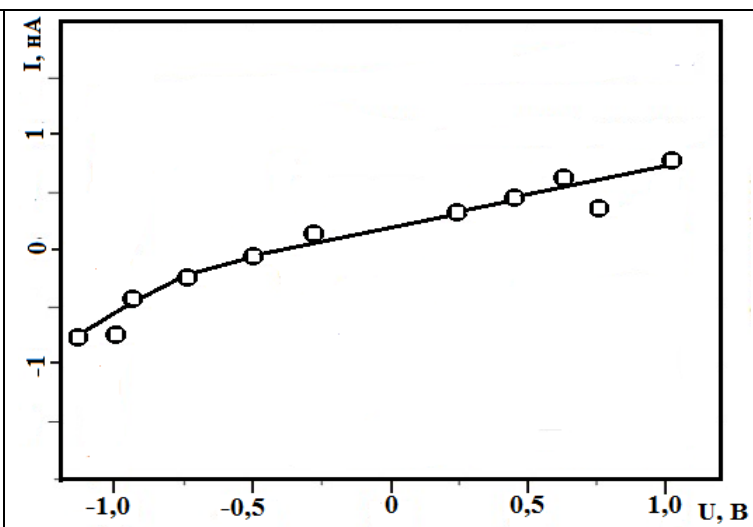


Рис.6.27. Залежність сили тунельного струму через комплексну сполуку ДНК-бета-каротин від величини напруги між підкладкою та вістрям СТЛ.

Також важливими результатами є реалізація пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації при зменшенні вартості біта, збільшенні швидкості доступу до комірок пам'яті, створенні запам'ятовуючого пристрою із застосуванням елементів нуклеїнових кислот, значне зменшення енергоспоживання. Важливість досліджень та розробок нових типів пам'яті в даній роботі наглядно видно із табл.6.3.

Табл.6.3. Дослідження та розробки нових типів пам'яті.

Тип пам'яті	MRAM	Енергонезалежна пам'ять на нових принципах				
		PRAM	ReRAM	FeRAM	STTRAM	NAM
Елементи комірки	1(2)T-1R	1T-1R або 1D1R	1T-1R або 1D1R	1T1C	1(2)T-1R	Молекулярний ланцюг
Комірка	Магнітний опір	Зміна фазового стану	Зміна опору	Зміна напрямку поляризації	Зміна обертового моменту спіна	Зміна послідовностей нуклеїнових кислот
Мінімальна площа комірки	20 F ²	4.8(4)F ²	4F ²	22F ²	6-20 F ²	<10 нм
Час запису/стирання	10нс/ 10 нс	20нс/ 50 нс	5 нс/5 нс	10 нс/10 нс	5-20/ 10	<10с/<10с
Кількість циклів	>3 ·10 ¹⁶	>10 ⁸	>10 ¹⁰	10 ¹⁴	10 ¹⁵	>10 ¹⁸
Використання	Зберігання	Зберігання	Зберігання /оперативна пам'ять	Зберігання	Зберігання	Зберігання
Енергоспоживання	10 пДж	пДж	< 10пДж	< 10пДж	< 10пДж	< 10пДж

Необхідно відмітити також місце та застосування запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації для побудови нейроморфних комп'ютерних платформ (табл.6.4 та 6.5), а в близькій перспективі- біокомп'ютерів.

Табл.6.4. Вимоги до створення нейроморфних комп'ютерних платформ.

Вимоги до створення нейроморфних комп'ютерних платформ (на основі універсальних процесорів, середовища із інтеграцією оперативної та довготривалої пам'яті і багаторівневих логічних станів)	
1.	Надвисока щільність пам'яті при зменшенні вартості біта
2.	Збільшення числа циклів перемикавання (операцій запису-стирання)
3.	Збільшення часу зберігання інформації в запам'ятовуючих пристроях
4.	Збільшення швидкості програмування та доступу до комірок
5.	Зменшення енергії електропоживання
6.	Збільшення можливостей реалізації мобільних пристроїв

Табл.6.5.Можливості застосування запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації в нейроморфних технологіях.

Можливості нейроморфних технологій (НТ) (побудовані на об'єднанні збереження та обробки даних в одній системі) для створення надпотужних комп'ютерів, подібних мозку людини	
1	Електронний 3D- синапс є процесором та пристроєм зберігання даних.
2	Один з важливих концептів НТ є синапс із перемикаючим опором в межах його зміни на кілька порядків. Процес йде за рахунок міграції і перебудови кисневих вакансій в середині оксиду.
3	3D –синапс може накопичувати та інтегрувати біти з кількох джерел та спрацьовувати при досягненні порога.
4	Світлові хвилі проходять матеріал шляхом оптичних імпульсів і перемикають середовище пам'яті подібно синапсу.
5	Багаторівневий постійний запам'ятовуючий пристрій з перехресним перемиканням на основі ДНК.

Як видно із табл.6.5 досить важливим доробком є реалізація електронного 3D синапсу із перемикаючим опором в межах його зміни на кілька порядків при використанні мемристорних наноструктур. Процес проходить за рахунок міграції і перебудови кисневих вакансій в середині оксиду.

Вимоги до створення нейроморфних комп'ютерних платформ та можливості застосування запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації у вказаних платформах приведені в табл.6.4 та 6.5.

Як видно із таблиць 6.3-6.5 пам'ять на мемристорних наноструктурах (ReRAM), пам'ять зі зміною фазового стану (PRAM) та пам'ять з використанням нуклеїнових кислот (NAM), які представлені в даній роботі є досить актуальними і необхідними для подальшого розвитку мікроелектроніки, наноелектроніки та інформатики.

Таким чином можна стверджувати, що застосування запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації з використанням нано- та молекулярних технологій відкриває значні можливості для реалізації нейроморфних технологій, побудованих на об'єднанні процесів збереження та обробки даних в середовищі з інтеграцією оперативної та довготривалої пам'яті для створення надпотужних нейроморфних комп'ютерних платформ, здатних проводити обробку інформації на рівні роботи мозку людини.

6.15. Висновки.

1. Запропоновано і обґрунтовано моделі реалізації виконавчих пристроїв основних генетичних процесів в біосистемах на основі запрограмованих біополімерів з відповідними програмами в генетичних структурах для дослідження ієрархії програмних систем в світлі концепції молекулярної кібернетики.

2. Запропоновано модель та вивчено механізм роботи нервової системи як паралельної обчислювальної машини, коли сигнали обробляються одночасно на мільйонах різних шляхів при роботі молекулярної пам'яті. Наприклад, сітківка ока передає складний вхідний сигнал мозку не порціями в десятки елементів, як комп'ютер, а у вигляді сигналу, інтегрованого від мільйона окремих елементів, які прибувають одночасно до закінчення зорового нерва, після чого вони також одночасно, в один прийом, обробляються мозком. Елементарний процесор мозку у вигляді нейрона

при відповіді на вхідний аналоговий сигнал забезпечує його обробку з переходом на частоту вихідного сигналу у вигляді ряду перетворень в залежності від вхідних сигналів.

3. Обґрунтовано на рівні моделей принципи роботи ДНК шляхом розгортання генних засобів програм реалізації клітинного функціонування нейрона за допомогою запуску роботи біохімічної машини, яка функціонує всередині нейронів за програмами, закладеними в генах і використовує можливості молекулярної пам'яті.

4. Досліджено важливу роль сигналу, що формується в залежності від постановки задачі у вигляді мотиваційної установки для створення структур довготривалої пам'яті в синапсах. На основі моделювання виділено головну властивість білків, які в якості ферментів-каталізаторів виконують функції керування в клітині за програмами ДНК. При цьому білки дозволяють відновлювати і саму ДНК. ДНК, як вказувалося вище, представляється своєрідним жорстким диском, що запускає роботу всієї субнаносистеми у вигляді ієрархії від клітини до організму.

5. Досліджено найважливіші нанотехнологічні особливості природних молекулярних машин. При дослідженні природних нанопристроїв слід зазначити, що здатність молекул самоорганізовуватися в структури різного функціонального призначення, а також відтворювати самих себе, закладеною в них програмою є основною рисою, що дозволяє функціонувати молекулярним машинам в організмі людини з використанням молекулярної пам'яті.

6. Створено запам'ятовуючий пристрій з надвисокою щільністю запису інформації, який включає в себе блок формалізованого представлення ДНК в цифровому вигляді даних, секвенатор ДНК та блок з набором ферментів для розрізання та зшивання нуклеотидів ДНК, набір нуклеотидів РНК для передачі інформації від джерела інформації на місце постійного зберігання інформації в ДНК за допомогою РНК-залежної ДНК-полімерази.

ВИСНОВКИ.

В дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну проблему – створення методів та моделей побудови запам'ятовуючих структур та пристроїв із надвисокою щільністю запису інформації з використанням нано- і молекулярних технологій. Запропоновано новий клас запам'ятовуючих пристроїв із надвисокою щільністю запису інформації на основі вказаних технологій. Зокрема представлені результати побудови запам'ятовуючих пристроїв на основі мемристорних нано-електронних структур, запам'ятовуючих пристроїв з використанням молекулярної електроніки з можливістю запам'ятовувати, відтворювати і обробляти інформацію за допомогою світла певної довжини хвилі, а також запам'ятовуючих пристроїв на основі використання властивостей обробки інформації в нанoeлектронних і молекулярних системах нейрона та його ядерних компонентах- ДНК і РНК.

Отримані наступні результати:

-Розроблена *технологія та методи розрахунків режимів обладнання* при виготовленні наноструктур, які включають застосування методів нанолітографії та методів зондового окислення, що дають можливість розробляти та виготовляти основні елементи для побудови запам'ятовуючих структур та пристроїв із надвисокою щільністю запису інформації;

- розроблено *метод створення пам'яті з надвисокою щільністю запису інформації* з використанням запам'ятовуючої матриці на основі мемристорних нанoeлектронних структур, опір яких змінюється при проведенні запису і стирання інформації і може бути використаний в побудові нейрона;

- розроблено *метод створення запам'ятовуючих пристроїв* з надвисокою щільністю запису інформації з використанням властивостей оптичної молекулярної нано-пам'яті із застосуванням органічного молекулярного запам'ятовуючого середовища та молекулярної інженерії фотоперемикаючих молекулярних пристроїв.

- розроблено *метод створення запам'ятовуючих структур* та пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації з використанням принципів обробки інформації в нанoeлектронних і молекулярних системах нейронів та їх ядерних компонентах- ДНК і РНК.

- удосконалено *технологію побудови молекулярної пам'яті* на основі білка бактеріородопсину із значно меншою вартістю і досягненням надвисокої щільності запису інформації;

- розроблена *модель реєстрації молекулярної пам'яті* на основі взаємодії оптичного випромінювання інфрачервоного діапазону зі структурами гемоглобіну для побудови пристроїв визначення рівня гемоглобіну в крові та визначення амплітуди пульсової хвилі в кровотоці судин;

- запропонована *модель роботи молекулярної пам'яті* на основі вивчення енергетичних характеристик електропровідності і магнітного поля в рефлексно-сенсорних модулях на поверхні тіла людини з використанням особливостей просторової взаємодії термохімічних потенціалів клітини та застосування НКВІД - магнітометра.

8. СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Вступ

B.1.Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R. S.The missing memristor found. – Nature letters, 2008, v.453, p.80–83.

В.2. Елисеев Н. Мемристоры и кроссбары: нанотехнологии для процессоров. – Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2010, №8, с.84–89

В.3. Ходаковський М.І. Розробка навчальних комп'ютерних комплексів з використанням принципів когнітивної підтримки в умовах функціонування молекулярної розподіленої пам'яті людини / Зб. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп'ютерні засоби, мережі та системи”. - К. - 2005. - № 4. - С.117-122.

В.4.Войтович І.Д., Корсунський В.М. Інтелектуальні сенсори.- Київ: Вид-во Ін-ту кібернетики ім.В.М.Глушкова НАН України, 2007.- 514 с.

В.5. Палагин А.В., Коваль В.Н., Рабинович З.Л. и др. Интеллектуальные решающие машины: проблемы создания и основные принципы // Упр. системы и машины. – 1992. – № 1/2. – С. 27-34.

В.6. Ходаковський М.І., Золотопуп А.І. Сверхплотная запись информации на основе молекулярных носителей для памяти перспективных ЭВМ // Праці Міжнар. симпозіуму з питань створення перших ЕОМ “Комп'ютери у Європі: минуле, сучасне і майбутнє”,-К.-1998 -С.271-273.

В.7. Ходаковский Н.И. Использование молекулярной памяти для сверхплотной записи информации в запоминающих устройствах вычислительной техники / Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України “Нові комп'ютерні засоби, обчислювальні машини та мережі”.-2001,т.1.-С.36-41.

В.8. Ходаковский Н.И. Этапы развития технологических подходов к созданию молекулярной элементной базы для вычислительной техники / Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Засоби комп'ютерної техніки з віртуальними функціями і нові інформаційні технології”.-К.-2002. - т. 1. -С. 4-9.

В.9. Ходаковский Н.И. Исследование процессов изготовления элементов молекулярных сенсорных устройств / Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім.

В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”.-К.-2003.- т.2.-С.134-138.

В.10. Ходаковский Н.И., Кравченко В.П., Шут Н.И. Разработка обучающей компьютерной системы на основе использования эффекта молекулярной памяти для подготовки авиадиспетчеров / Зб.наук.праць Державної льотної академії України. – Кіровоград. - 2004. -вип. 9. - С.63-71.

В.11. Ходаковский Н.И., Сытник А.Г. Особенности разработки систем технического зрения для восстановления зрительной функции человека // Управляющие системы и машины, 2000.-№2. –С.35-41.

В.12. Humphrey, W., et al., Molecular dynamics study of bacteriorhodopsin and artificial pigments. Biochemistry, 1994. 33(12): p. 3668-78.

В.13. Schreiber H., Steinhäuser D., Schuster P. Parallel Molecular Dynamics of Biomolecules // Parall.Comput.- 1992. – v.18, N5.-P. 557-573.

В.14. Гринченко С.Н. Системная память живого как основа его метаэволюции и периодической структуры.-М.: ИПИ РАН.- 2004.-512 с.

Розділ 1.

1.1. Неволин В.К. Управляемый массоперенос с нанометровым разрешением. //Электронная промышленность.-1991.- N3.-С.30-32.

1.2. Неволин В.К. Физические основы туннельно-зондовой нанотехнологии // Электронная промышленность, 1993.№10.-С. 8-15.

1.3. Золотопуп А.И., Яворский И.А.,Ходаковский Н.И., Климентович В.А. Моделирование процесса формирования наноструктур в проводящих пленках с помощью туннельного сканирующего микроскопа / Зб. наук. праць «Перспективні засоби обчислювальної техніки та інформатики», Київ: Ін-т кібернетики ім.В.М.Глушкова НАН України.- 1999.- С.61-68.

1.4. Золот А.І., Ходаковський М.І. Дослідження фізико-технологічних процесів формування наноструктур для створення наноприладів та керування їхніми властивостями // Управляющие системы и машины, 2007. -№ 1.- С.48-52.

1.5. Неволин В.К. Нанотехнология в газовых средах с помощью туннельного микроскопа// Электронная техника. Сер.3. микроэлектроника. – 1990. – Вып. 1(155). – С.27-29.

1.6.В.А.Быков, С.А.Саунин. Новые приборы и возможности в сканирующей зондовой микроскопии // Материалы Всероссийского совещания «Зондовая микроскопия-99», Нижний Новгород, 10-13 марта 1999, с.132-133.

1.7. Патент UA №39552. H01 L21/00. Пристрій для виготовлення еталонних структур на основі атомно-силової мікроскопії електростатичних сил / Ходаковський М.І., Золот А.І., Ларкін С.Ю., Воронько А.О. –Опубл. 25.02.2009, бюл. №4.

1.8.Ходаковский Н.И., Ларкин С.Ю., Галстян Г.Г. Исследование методов локальной диагностики структурных свойств наноструктур с использованием электростатической силовой микроскопии/ II Междунар. науч. конф. ”Наноструктурные материалы -2010: Беларусь-Россия-Украина”, Киев,2010 г.

1.9. Наумова О.В., Антонова И.В., Попов В.П. и др. Нанотранзисторы кремний-на-изгибе: перспективы и проблемы реализации// Физики и техника полупроводников, 2003, том 37, вып.10.- С.1253-1259.

1.10. Обухов И.А. О возможности применения СТМ-АСМ литографии для создания новых типов квантовых приборов// Микросистемная техника.- 2003, №6.- С.34-37.

1.11. Математическое моделирование в нанотехнологиях с помощью программы nanoXplorer. – [http:// www. Nanonewsnet.com](http://www.Nanonewsnet.com).

Розділ 2.

2.1. G.Abadal, F.Peres-Murano, N.Barniol, X.Aymerich, “Field induced oxidation of silicon by SPM: study of mechanism at negativ sample voltage by STM, ESTM and AFM”, Appl.Phys. A,, 1998, vol. 66, p. 791-795.

2.2. Золот А.І., Ходаковский Н.И. Подходы к созданию методов формирования нанoeлектронных структур с высокой воспроизводимостью / Материалы 18-ой международной конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”- КрыМиКо’2008.- Севастополь.- 2008.- С.84-85.

2.3. Патент України UA 80154, H01 L21/67, B 82B 3/00, опубл. 27.08. 2007, Бюл.№13. Пристрій для виготовлення наноструктур / Золотопуп А.І., Ходаковський М.І., Ларкін С.Ю., Коржинський Ф.Й., Мержвинський П.А. - опубл. в бюл. № 13, 2007.

2.4. M.Galleja, J.Anguila, R.Garcia, K.Birkelund, R.Perz-Murano, J.A.Dagata Nanometre-scale oxidation of silicon surfaces by dynamic force microscopy: reproducibility, kinetics and nanofabrication // Nanotechnology, 1999, vol.10, p. 34-38.

2.5. S. Lemeshko, S.Gavrilov, V.Shevyakov, V.Roschin, R.Solomatenko. Investigation of tip-induced ultrathin Ti film oxidation kinetics // Nanotechnology, 2001, vol. 12, p. 273-276.

2.6. С.А.Ковалева, В.А.Пилипенко, В.С.Сякерский, Т.В.Петлицкая, П.А.Витязь, Л.Д. Буйко. Морфология и структура локальных анодных пленок оксида кремния, полученных зондовым окислением с использованием атомно-силового микроскопа // Материалы VII Международного семинара «Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии», Москва, 2008г.

2.7. M.T.Cuberes, R.R.Schlittler, J.K.Gimzewski. Room temperature supramolecular repositioning at molecular interfaces using scanning tunnelling microscope.-Surface Sci.Lett., 1997, v.371, P.231-234.

2.8. Гаврилов С.А., Лемешко С.В., Рощин В.М., Соломатенко Р.Г., Шевяков В.И. Исследование особенностей процесса локального окисления плёнок титана на основе сканирующей зондовой микроскопии // Известия вузов. Электроника. - 2000. - №3. - С. 13–19.

Розділ 3.

3.1. Chua L.O. Memristor – the missing circuit element. – IEEE Trans. Circuit Theory, 1971, v.18, p.507–519.

3.2. Білоголовський М.О. Мемристор — новий нанорозмірний елемент електронної схемотехніки // Вісник НАН України.- 2014, № 2.- С.32-39.

3.3. Белоголовский М.А., Ларкин С.Ю. Нанoeлектронные устройства с памятью на основе эффекта электромиграции кислородных вакансий в сложных оксидах переходных металлов // Електроніка та зв'язок. — 2013. — № 2. — С. 9—15.

3.4. Вохминцев А.С., Вайнштейн И.А., Камалов Р.В., Дорошева И.Б. Мемри- стивный эффект в нанотубулярном слое анодированного диоксида титана // Изв. РАН, сер. физич.-2014.-т.78, №9.-С.1176-1179.

3.5. Чистяков Ю.Д. Введение в процессы интегральных микро- и нанотехноло- гий. Том 1. Физико-химические основы технологии микроэлектроники. М.-Бином. Лаборатория знаний.-2010.- 392 с.].

3.6. Waser R., Dittmann R., Staikov G., Szot K. Redox-based resistive switching memories – nanoionic mechanisms, prospects, and challenges. – Advanced Materials, 2009, v.21(25–26), p.2632–2663.

3.6. Петухов Д. И. Синтез и исследование свойств пористого TiO₂, полу- ченных анодным окислением / Д. И. Петухов // Альтернативная энергетика и эколо- гия (АЭЭ) – 2007. – № 1(45). – С. 65-69.

3.7. Chen C. A mechanism for the formation of annealed compact oxide layers at the interface between anodic titania nanotube arrays and Ti foil / C. Chen, W. Say, S. Hsieh // Springer-Verlag. – 2009. – №95. – P. 889-898.

3.8. Macak J. M. Smooth Anodic TiO₂ Nanotubes / J. M. Macak, H. Tsuchiya, L. Taveria // Angew. Chem. Int. Ed. – 2005. – № 44. – P. 1-4

3.9. Аверьянов Е. Е. Справочник по анодированию. – М.:Машиностроение, – 1988, – 224 с.

3.10. Petukhov D. Formation mechanism and packing options in tubular anodic tita- nia films / D. Petukhov, A. Eliseev, I. Kolesnik // Microporous and Mesoporous Materials. – 2008. – №114.– P. 440-447.

3.11. Kamarozamana N.Effect of Oxygen Flow Rate on the Memristive Behavior of Reactively Sputtered TiO₂ Thin Films / N. Kamarozamana, M. Shamsul, Z. Aznilinda [et al.] // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1024. – P. 64-67.

3.12. Strachan J. Structural and chemical characterization of TiO₂ memristive devic- es by spatially-resolved / J. Strachan, J Yang, R. Munstermann [et al.] // Nanotechnolo- gy. – 2009. – Vol. 20, – P. 4857-4863.

3.13. Rahman K. Electrohydrodynamic printed TiO₂ flexible memory device – fabrication and characterization / K. Rahman, M. Mustafa, N. Muhammad [et al.] // Electronics letters. – 2012. – Vol. 48, – № 20. – P. 86-94.

3.14. Jo S. High-density crossbar arrays based on Si memristive system / S. Jo, K. Kim // Nano Lett. – 2009. – Vol. 9, – № 2. – P. 870-874.

3.15. Pershin Y.V., Di Ventra M. Neuromorphic, digital and quantum computation with memory circuit elements // Proc. IEEE. — 2012. — V. 100, N 6. — P. 2071—2080.

3.16. Ventra M. D. Memcomputing: a computing paradigm to store and process information on the same physical platform / Y.V. Pershin, M.D. Ventra // Nature Physics. – 2013. – Vol. 9, – P. 200-202.

3.17. Marachovsky L.F. Basic Concepts to Build the Next Generation of Reconfigurable Computing Systems / L.F. Marachovsky // International Journal Of Applied And Fundamental Research. – 2013. – № 2. – P. 234-240.

3.18. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. Физические величины. Справочник. – М.; Энергоатомиздат, – 1991. – 1232 с.

3.19. US Patent № 8507968 B2. – H01 L29/76.- Memristive transistor memory.– D.B.Strukov, P.Stewart, Z.Li.- Aug.13, 2013.

3.20. US Patent № 8502343 B1. – H01 L29/00.- Nanoelectric memristor device with dilute magnetic semiconductors.– R. Jha, J.O. Long.- Aug.6, 2013].

3.21. Агеев О.А., Смирнов В.А., Авилов В.И. Матрица памяти на основе мемристорных наноструктур.- Патент РФ № 148262 U1. – опубл.27.11.2014 г.],

3.22. Ходаковський М.І. Мудренко М.І. Запам'ятовуюча матриця на основі мемристорних наноелектронних структур.- Патент України на корисну модель № 125453.- Бюл. „Промислова власність” №9.-2018 р.

Розділ 4.

4.1. Сытник А.Г., Ходаковский Н.И. Исследование и разработка системы управления твердотельными модулями с целью построения видеостен для отображения графической и полутоновой информации// УСиМ, К.-1999.-№ 4.-С.27-31.

4.2. Золотопуп А.И., Ходаковский Н.И. Исследование возможностей реализации цветных плоских экранов и системы обработки информации для их управления // Электроника и связь, К., 1999. - №6. - Т.1. - С.173-177.

4.3. Каламкар Г.Р., Островский М.А. Молекулярные механизмы зрительной рецепции "Наука", 2002 - 275 с.

4.4. Wise, K., Optimization of bacteriorhodopsin for bioelectronic devices. Trends in Biotechnology, 2002. 20(9): p. 387-394.

4.5. Hampp N. Bacteriorhodopsin as a Photochromic Retinal Protein for Optical memories // Chemical Reviews.- 2000, v.100.-P.1755-1776.

4.6. Островский М.А., Мозговая М.Н., Фельдман Т. Б. и др. Способ фотопереключения ретинальсодержащего белка и оптический логический элемент.-Патент РФ № 2420773, опубл.10.06.2011 г.],

4.7. Краюшкин М.М., Яровенко В.Н., Христофорова Л.В. и др. Фотохромная регистрирующая среда для трехмерной оптической памяти.-Патент РФ № 2463330, опубл.10.10.2012 г

4.8. Tsien R.Y., Heim R., Cubitt A.B., Dickson R.M., Moerner W.E. Photochromic fluorescent proteins and optical memory storage devices based on fluorescent proteins./ Патент США №6046925.- Опубл.04.04.2000 р.]

4.9. Зафиров А., Раковски С., Бакарджиева-Енева Я. Носитель информации для оптических запоминающих устройств, способ получения указанных носителя информации и оптического запоминающего устройства с соответствующим записывающим слоем.- Патент РФ № 2248623, опубл.20.03.2005 г

4.10. Ходаковський М.І. Мудренко М.І. Запам'ятовуючий пристрій на основі оптичної нанопам'яті.- Патент України на корисну модель.-Опубл. 10.08.2018 р.- Бюл.№15, 2018 р.

Розділ 5.

5.1. Нестерук Ф. Г. Безопасное хранение данных в нейросетевых информационных системах // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т.46, № 7. С. 52-57.

5.2. Нестерук Г. Ф., Нестерук Ф. Г. Организация параллельной обработки данных в многофункциональной памяти // Омский научный вестник. 2000. Вып. 10.

C.100 - 104.

5.3. Яхьева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети. – М.: Интернет-Университет Информационных технологий: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 316 с.

5.4. Halkidi M., Batistakis Y., Vazirgiannis M. On Clustering Validation Techniques // Journal of Intelligent Information Systems. 2003.- 17:2/3.- P. 107–145.

5.5. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям.-М.: Эдиториал УРСС.- 2002.- 352 с.

5.6. Савельев А. В. Источники вариаций динамических свойств нервной системы на синаптическом уровне // журнал “Искусственный интеллект”, НАН Украины. — Донецк, Украина, 2006. — № 4. — С. 323-338.

5.7. Шульговский В.В. Физиология высшей нервной деятельности с основами нейробиологии.– М.: Изд-й центр «Академия», 2003. – 464с.

5.8. Теслинова Е.А. Разработка онтологии системы управления знаниями организации с использованием методологии концептуального проектирования // Успехи современного естествознания. – 2006. – № 9 – стр. 96-98.

5.9. Лапшин В.А. Онтологии в компьютерных системах. М.: Научный мир, 2010.-224 с.

5.10. Gruber T.R. The role of common ontology in achieving sharable, reusable knowledge bases // Principles of Knowledge Representation and Reasoning. Proceedings of the Second International Conference. J.A. Allen, R. Fikes, E. Sandewell – eds. Morgan Kaufmann, 1991, 601-602.

5.11. Hanazato Y., Nakako M., Maeda M., Shiono S. Glucose sensor based on field effect transistors with a photolithographically patterned glucose oxidase membrane// Anal.Chim.Acta.1987.vol.193.P.87-96.

5.12. Selfridge O.G. Pandemonium: A paradigm for learning / Proceedings of a symposium held at the National Physical Laboratory.- November, V.1, 1958.-London: her majesty's stationery office.- P.513-529.

5.13. Спосіб електропунктурної діагностики.- Пат.України №31160 А.-опубл.в бюл.№7-11 від 15.12.2000 р./ Тиднюк В.З., Радкевич Т.О.,Гриценко В.І.Береговський Б.О. та ін.

5.14. Schreiber H., Steinhauser D., Schuster P. Parallel Molecular Dynamics of Biomolecules // Parall.Comput.- 1992. – v.18, N5.-P. 557-573.

5.15. Long W.J.,Naimi S.,Criscitiello W.G. Development of a Knowledge Base for Diagnostic Reasoning in Cardiology // Computers Biomed. Res. –1992.- v.25,N3.- P. 292 – 311.

5.16. Interactive control of biomechanical animation / T.Ertl, H.Ruder // Visual Computer.- 1993.- v.9.- N8.- P. 459-465.

5.17. Mendelson A. A technical adventure in medical imaging // Computer Des. 1994.-v.33, N3.- P. 97-104.

5.18. Рашевський П.К. Риманова геометрія і тензорний аналіз.- М.: Наука, 1967.- 664 с.

5.19. М. Х. Карапетьянц, С. И. Дракин. Общая и неорганическая химия. – М.: «Химия», 1981. – 631 с.

5.20. В. И. Зубов. Лекции по теории управления. – М.: Наука, 1975. – 494 с.

5.21. C.Joachim, J.K.Gimzewski. "An electromechanical amplifier using a single molecule".Chem.Phys.Lett.,1997, 265, P.353-357.

5.22. Введенский В.Л., Ожогин В.И. Сверхчувствительная магнитометрия и биомагнетизм.- М.: Наука, 1986.- 199 с.

5.23. Болодурина И.П., Луговскова Ю. П. Оптимальное управление иммунологическими реакциями организма человека // Проблемы управления. - 2009. - N 5. - С. 44-52.

5.24. Tarakanov A. O., Skormin V. A., Sokolova S. P. Immunocomputing: Principles and Applications. New York.: Springer, 2003, 230 p.

5.25. Stieve H. Sensors of biological organisms - biological transducers// Sensors and Actuators.1983, vol.4.-P.689-704.

5.26. Кудрявцев В.Б., Вашик К., Строгалов А.С., Алисейчик П.А., Перетрухин В.В. Об автоматном моделировании процесса обучения // Дискретная математика.

Т. 8. № 4. М., 1996. С. 3-10.

5.27. Подколзин А.С. О развитии техники моделирования логических процессов // Интеллектуальные системы, т.10, вып. 1-4, 2006.- С. 169-188.

5.28. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта/ Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука, 1986. 312 с.

5.29. Борисов Н.А., Борисов А. А. Иерархия моделей базы знаний обучающей системы // Компьютерные технологии в управлении, медицине, образовании: Сб. науч. трудов. Тверь: ТГТУ, 2006. С. 54-59.

5.30. Бечин С.В. «Эволюция нейронных систем», 2012. -69с. www.sciteclibrary.ru/texsts/rus/stat/st440.htm

5.31. Эрик Кандель. В поисках памяти. М.: Астрель, - 2012.-736 с.

5.32. Анохин К.В. Молекулярные сценарии консолидации долговременной памяти. ЖВНД, 1997.-47: 261-279.

5.33. Анохин К.В. Ранние гены в механизмах обучения и памяти. Автореферат дисс. на соискание ученой степени доктора мед. наук, НИИ нормальной физиологии им. П.К.Анохина РАМН, Москва. 1992.-48 с.

5.34. Горелов А.А. Концепции современного естествознания : – М.: ВЛАДОС, 1999. – 512 с.

5.35. Савельев А. В. Методология синаптической самоорганизации и проблема дистальных синапсов нейронов // Журнал проблем эволюции открытых систем. — Казахстан, Алматы, 2006. — Т. 8. — № 2. — С. 96—104.

5.36. Блонский П. П. Основные предположения генетической теории памяти // Хрестоматия по психологии памяти. – Режим доступа: [www. psychology Online. Net](http://www.psychologyonline.net);

5.37. Войтович И.Д., Золот А.И., Ходаковский Н.И. Основные принципы моделирования, проектирования и изготовления медицинских нанороботов// Математичні машини і системи. – 2009, №4. – С.147-160.

5.38. Аткинсон Р., Шифрин Р. Человеческая память: система памяти и процессы управления // Психология памяти. - М.: ЧеРо, 2000. - С.517-546.

5.39. Клацки Р. Забывание и естественный язык. Хрестоматия по психологии памяти.–Режим доступа: [www. psychology Online. Net](http://www.psychologyonline.net);

5.40. Козаренко В. А. Учебник мнемотехники. – Режим доступа: /www.mnemotexnika.narod.ru;

5.41. Слядников Е.Е. Физическая модель и ассоциативная память дипольной системы микротрубочки цитоскелета // Журн.техн.физики.- 2007.-т.77.-вып.7.- С.2524-2528.

5.42. Spalding E., Wilson A. Demystifying reflection: A study of pedagogical strategies that encourage reflective journal writing // Teachers College Record.-2002.-v.104.- P.1393-1421.

5.43. Антомонов, Ю. Г. Моделирование биологических систем. – Киев: Наукова думка, 1977. – 260 с.

5.44. Витяев Е.Е. Измерение и модели когнитивных процессов / Сб. труд. СО РАН «Вычислительные системы».-Новосибирск.- 1998.- т.162.- С. 14-40.

5.45. Хакен Г. Принципы работы головного мозга. Синергетический подход к активности мозга, поведению и когнитивной деятельности. М.: ПЕР СЭ, 2001. 350 с.

5.46. Витяев Е.Е. Целеполагание как принцип работы мозга // Модели когнитивных процессов/ Сб.тр.ИМ СО РАН. «Вычислительные системы».-Новосибирск.- 1997.-т.158.- С.9-52.

5.47. Иваницкий А.М. Физиологические основы психики. //Природа. - 1999. - №8. - С.156-162.

5.48. Кропотов Ю.Д., Пономарев В.А. Нейрофизиология целенаправленной деятельности. - С.-П.: Наука. - 1993. - 171с.

5.49. Орлов Ю.М. Восхождение к индивидуальности. М.: Просвещение. - 1991. -286с.

5.50.Стрижак Л.Н. Психология и педагогика. М.: МГИУ.- 2000.-335 с.

5.51. Хомская Е.Д. Нейропсихология. Спб.: Питер.-2011.-496 с.

5.52. Симонов П.В. Информационная теория эмоций. // Психология эмоций. - М.: изд-во МГУ. - 1993. - С.188-195.

5.53. Состояние души. Беседы о педагогике как науке о путях реализации функциональных возможностей мозга./Б.И. Вершинин, Л.Е. Попов, С.Н. Постников, М.И. Слободской. – М.: Концептуал, 2011 г. – 352 стр.

- 5.54. Алфимов М.В. Нанотехнологии. Роль компьютерного моделирования // Российские нанотехнологии, 2007.- Т.2, №7-8.- С.1-5.
- 5.55. C.Joachim, J.K.Gimzewski. "An electromechanical amplifier using a single molecule".Chem.Phys.Lett.,1997, 265, P.353-357.
- 5.56. M.T.Cuberes, R.R.Schlittler, J.K.Gimzewski. Room temperature supramolecular repositioning at molecular interfaces using scanning tunnelling microscope.-Surface Sci.Lett.,1997, v.371,P.231-234.
- 5.57. Preston K.,Duff M.J.B.,Levialdi S. et.al. Basics of cellular logic with some applications in medical image processing // Proc.IEEE.1979.Vol.67. P.149-185.
- 5.58. Khodakovskiy M., Orel V., Budnyk M., Budnyk V., Voitovych I. Experimental studying magnetic nanocomplexes with doxorubicin for drug delivery and cancer therapy // Materials of the Mediterranean - East Europe Meeting “Multifunctional Nanomaterials” (NanoEuroMed-2011), 12-14 May 2011. – Uzhgorod. – P.192.
- 5.59. Drexler K.E. Engine of Creation: The Coming Era of Nanotechnology.- NY.: Ancor Press, 1986.- 387 p.
- 5.60. Drexler K.E. Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing and Computation.- NY.: John Wiley and Sons, 1992.- 362 p.
- 5.61. Войтович И.Д., Корсунский В.М. На пути к созданию портативной автоматической системы регулирования глюкозы в крови // Сенсорная электроника и микросистемные технологии.-2006.- №1.-С.47-63.
- 5.62. Квантовый компьютер и квантовые вычисления. Т.2 / Под. ред. Садовниченко В.А. Ижевск: РХД.- 1999.- 407 с.
- 5.63. Войтович І.Д., Корсунський В.М. Перспективи квантових обчислень з використанням надпровідності // Математичні машини і системи.- 2008, №4.- С.23-56.
- 5.64. Freitas R.A. Nanomedicine. V.1: Basic Capabilities. – Tx.: Landes Bioscience,Austin, 1999.-394 p.
- 5.65. Ходаковский Н.И. Исследование процессов изготовления элементов молекулярных сенсорных устройств// Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім.

В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”.-К.-2003.-т.2.-С.134-138.

5.66. Золот А.І., Ларкін С.Ю., Ходаковський М.І., Коржинський Ф.Й., Мержвинський П.А. Шкляр М.П. Пристрій для контролю формування нанорозмірних структур/ Патент UA № 77015, бюл. №10 від 16.10.06 р.-10 с.

5.67. Freitas R.A. Exploratory Design in Medical Nanotechnology: A Mechanical Artificial Red Cell, Artificial Cells, Blood Substitutes.- Immobil.Biotech. -1998. -26.-P. 411-430.

5.68. Тыннюк В.З., Горин Ф.Н., Кравченко В.П., Шевчук Б.М., Шут Н.И., Козакул А.В. О возможности моделирования поля живых организмов с помощью общей теории относительности // Наукові записки НПУ ім.М.П. Драгоманова, серія ф.-м. наук.- 2002.-С. 105-112.

5.69. Тыннюк В.З., Горин Ф.Н., Кравченко В.П., Береговский Б.А., Шевчук Б.М. К вопросу об информационной модели в теории полей живых организмов // Проблемы управления и информатики.- 2003, №2.- С. 145-152.

5.70. Введенский В.Л., Ожогин В.И. Сверхчувствительная магнитометрия и биомагнетизм.- М.: Наука, 1986.- 199 с.

5.71. Волков Е.С., Зубчук В.И.,Синекон Ю.С. Современные аспекты магнито-биологии и магнитотерапии./ В сб.докл. конф. “Проблемы физической и биомедицинской электроники”.-Киев: 18-20 мая, 1995.-С. 1-6.

5.72. Физиология человека. Под ред. Р.Шмидта и Г. Тевса. –М.:Мир,1996.- 432 с.

5.73. Тыкочинская Э.Д. Основы иглорефлексотерапии.-М.: Медицина,1979.- 343 с.

5.74. Василик П.В., Ходаковский Н.И. Об одном подходе к построению модели системных мутаций // Сб.научн.тр. Ин-та кибернетики им.В.М. Глушкова и Междунар. науч.-учебн. центра информ. технологий и систем “Информационные технологии в медицине и биологии”,2000.-С. 36-44.

Розділ 6.

- 6.1. Shiffrin, R. M. Memory search. In Donald A. Norman (Ed.), Models of human memory. New York: Academic Press, 1970.- P. 375-447.
- 6.2. Кляцки Р. Память человека.- М.:Мир.-1978.- 320 с.
- 6.3. Tour J. M., “Conjugated Macromolecules of Precise Length and Constitution. Organic Synthesis for the Construction of Nanoarchitectures,” Chem. Rev., vol. 96.-1996.- P.537-554.
- 6.4. A. Dhirani et al., “Self-assembled molecular rectifiers,” J. Chem. Phys., vol. 106.-1997.-P. 5249-5253.
- 6.5. Prokudina E.I., Valeev R.Y., Tchuraev R.N. A New Method for the Analysis of the Dynamics of the Molecular Genetic Control Systems. II. Application of the Method of Generalized Threshold Models in the Investigation of Concrete Genetic Systems. // J. theor. Biol., 151, 1991.- С. 89-110.
- 6.6. Войтович И.Д., Золот А.И., Ходаковский Н.И. Основные принципы проектирования и изготовления медицинских нанороботов// Математичні машини і системи. – 2010, №1. – С.95-104.
- 6.7. Ляпунов А.А., Яблонский С.В. Теоретические проблемы кибернетики. // Проблемы кибернетики, 9, 1963.- С. 5-22.
- 6.8. Полетаев И.А. К определению понятия “информация”. Семантический аспект // Исследования по кибернетике. Сов. радио, Москва, 1970.- С. 211-227.
- 6.9. Tchuraev R. N. A New Method for the Analysis of the Dynamics of the Molecular Genetic Control Systems. I. Description of the Method of Generalized Threshold Models. // J. theor. Biol., 151, 1991.- С. 71-87.
- 6.10. Tchuraev R.N. On storing, coding, passing and processing the hereditary information in living systems. // Computational technologies, 5, Special Issue, 2000.-С. 100-111.
- 6.11. Ходаковский Н.И. Исследование принципов создания обучающих компьютерных систем на основе эффекта молекулярной памяти и специальных экспертных систем / Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”. - К. - 2004. - № 3. - С.111-116.

6.12. Liberman E.A., Minina S.V. Cell molecular computers and biological information as the foundation of nature's laws // Biosystems. 1996. Т. 38. № 2-3. С. 173-177.

6.13. Ходаковский Н.И. Исследование процессов работы молекулярных устройств при формировании памяти в ядре нейрона // Комп'ютерні засоби, мережі та системи.-2017 р.-С.118-125.

6.14. Аптер М. Кибернетика и развитие. М.: Мир, 1970. 215 с.

6.15. Ходаковский Н.И.,Осинский В.И. Исследование процессов записи информации на ДНК-комплексах нейрона / Зб. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України "Комп'ютерні засоби, мережі та системи". - К. - 2016. - № 15. – С.86-93.

6.16. Alivisatos, A.P.,K.P.Johnsson, X.G.Peng., T.E.Wilson,C.J.Loweth, M.Bruchez, and P.G.Schultz, 1996. Organization of nanocrystal molecules using DNA. Nature 382: P.609-611.

6.17. С.Хамерофф, Р.Пенроуз.Оркестрованная объективная редукция квантовой когерентности в микротрубочках мозга: «Orch OR» модель сознания.// Mathematics and Computer Simulation 1996.-40.- С.453-480.

6.18. Чернавский Д С, Чернавская Н М Белок-машина: Биологические макро-молекулярные конструкции.-М.: Янус-К, 1999.-256 с.

6.19. Brown R. E., Milner, P. M. The legacy of Donald O. Hebb: More than the Hebb Synapse// Nature Reviews Neuroscience.-2003,N4, P.1013-1019.

6.20. Rubinov, M., Sporns, O. Complex network measures of brain connectivity: Uses and interpretations // Neuroimage.-2010, v.52, P.1059-1069.

6.21. Потієнко М.В. Структурна модель процесів пам'яті людини // Вісник Київського університету. Серія: фіз.-мат. науки. – 2010. – Вип. 4. – С. 169-172.

6.22. Борисюк Г.Н., Борисюк Р.М., Казанович Я.Б., Иваницкий Г.Р. Моделирование динамики нейронной активности и обработка информации в мозге – итоги "десятилетия". Успехи физических наук, 2002.-172, 10.- С. 1189-1214.

6.23. E. B. Baum. Building an associative memory vastly larger than the brain // Science, 268: April 28, 1995.-P.583-585.

- 6.24. Анохин К.В. Психофизиология и молекулярная генетика мозга // Психофизиология. СПб.: Питер. 2001. 427 с.
- 6.25. Соколов Е.Н., Незлина Н.И. Долговременная память: неирогенез и сигнал новизны // Журн. ВНД. 2003. Т. 53. № 4. С. 451-463.
- 6.26. Alexandrov Yu.I., Jarvilehto T. Activity versus reactivity in psychology and neurophysiology // Ecological Psychology. 1993. V. 5. P. 85-103.
- 6.27. Kandel E.R., Spencer W.A. Cellular neurophysiological approaches in the study of learning // Physiol. Rev. 1968. Vol. 48. P. 65—134.
- 6.28. Craik F. I. M., Lockhart R. S. Levels of processing: A framework for memory research // Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 1972, 11, P.671—684.
- 6.29. Соколов Е.Н., Незлина Н.И. Условный рефлекс: детектор и командный нейрон // Журн. ВНД. 2007. Т. 57. № 1. С. 5—22.
- 6.30. Смирнов В.М., Будылина С.М. Физиология сенсорных систем и высшая нервная деятельность [электронный ресурс //www.bookman.ru].
- 6.31. Tulving E., Thomson D. M. Retrieval processes in recognition memory: Effects of associative content // Journal of Experimental Psychology, 1971, 87, P.116—124.
- 6.32. Хайкин С. Нейронные сети.- М.: Вильямс, 2008 – 1103 с.
- 6.33. Лупичев Л.Н. Динамические процессы в сложноорганизованных системах.-М.-ИФТП.1991.-138 с.
- 6.34. N. Goldman, P. Bertone, S. Chen, C. Dessimoz, E. M. LeProust, B. Sipos, E. Birney. Towards practical, high-capacity, low-maintenance information storage in synthesized DNA // Nature.- February 2013.- v.494.- P.77–80.
- 6.35. J. Bonnet, P. Subsoontorn, D. Endy. Rewritable digital data storage in live cells via engineered control of recombination directionality // Proceedings of the National Academy of Sciences. - april 2012.- vol. 109, N 23.- P.8884-8889
- 6.36. G. M. Church, Y. Gao, S. Kosuri. Next-Generation Digital Information Storage in DNA // Science.- September, 2012.- Vol. 337, Issue 6102.- P.1628]
- 6.37. Мантуров А.О., Гуторов М.А. Способ секвенирования ДНК и устройство для его осуществления.- Патент РФ № 2539038, опубл. 10.01.2015г.],

6.38. Ходаковський М.І. Запам'ятовуючий пристрій з надвисокою щільністю запису інформації. –патент України на корисну модель №124147, опубл.26.03.2018.

6.39. Toropova K.A., Anokhin K.V., Tiunova A.A. Blockade of Histone Deacetylation in the Brain Modulates the Expression of Transcription Factors c-FOS and ZENK and Potentiates the Formation of Long-Term Memory in Neonatal Chicks // Neuroscience and Behavioral Physiology.- 2016.-v.46, № 3.-P. 256-263;

6.40. Gallistel C., Balsam P. Time to rethink the neural mechanisms of learning and memory // Neurobiology.- 2014.-v.108.-P.136-144;

6.41. Chen S., Cai D., Pearce K., Sun P., Roberts A., Glanzman D.L.Reinstatement of long-term memory following erasure of its behavioral and synaptic expression in Aplysia // Neuroscience.- November, 2014.-N17.-P.1-14].

ДОДАТКИ

Д.1. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні положення дисертації опубліковано у 89 наукових працях, у тому числі 1 розділ в колективній монографії, 45 статтях у наукових фахових виданнях, з них 5 статей, виданих в зарубіжних наукових виданнях, 13 статей у виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз, а також у 20 авторських свідоцтвах і патентах України; 23 матеріалах конференцій. У роботах із співавторами (згідно переліку посилань нижче) особистий внесок здобувача наступний:

У роботах [2-4,18,22-24,26,27,29,49-53,70,72-74,77,80] оглядово-аналітичного характеру здобувач прийняв участь в збиранні, систематизації, аналізуванні та узагальненні інформації щодо фізичних механізмів формування наноструктур, зокрема мемристорних наноелектронних структур. Досліджені та запропоновані методи створення запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації на основі мемристорних наноструктур. У роботах [1,5,10,11,13,21,33,36,37,39,47,56,67,69] здобувач прийняв участь в систематизації, аналізуванні та узагальненні щодо фізичних механізмів формування молекулярної пам'яті, зокрема з використанням молекулярних носіїв пам'яті на основі бактеріородопсину та фітохрому. Запропоновані методи створення запам'ятовуючих структур та пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації на основі молекулярної пам'яті. У роботах [68,81] здобувач брав безпосередню участь в розробці і виготовленні запам'ятовуючих структур та пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації на основі наноструктур та молекулярної пам'яті. У роботах [38,40] здобувач описав створення та використання методів формування структур молекулярної пам'яті. У роботах [14,16,31,32,34,35,78,82,84,85] досліджені фізичні процеси та запропоновані моделі роботи молекулярної та імунної пам'яті в організмі людини. У роботах [54-56,58,59,61-63,75,79] здобувач запропонував способи побудови інтелектуальних біосенсорів на основі наносенсорів та фізичних механізмів взаємодії молекулярного шару органічного матеріалу з оптичним випромінюванням, зокрема взаємодії білка гемоглобіна з оптичним

випромінюванням [57,60]. Отримані результати запам'ятовувались і оброблялись при створенні дослідних зразків вимірювальних сенсорних приладів для безконтактної діагностики стану організму людини [41,43,44,86,87]. У роботах [7,13] досліджені та проаналізовані методи структурування інформаційних потоків у комп'ютерних навчаючих системах шляхом системної ієрархізації значеннєвих фрагментів. Здобувачем запропоновано і обґрунтовано ідеї корисних моделей та винаходів [47-63,65,66] прийнято участь в їх експериментальній апробації, підготовці заявок та складанні формул корисних моделей та винаходів.

1. Гераїмчук М.Д., Зінченко В.П., Лапінський В.В., Ходаковський М.І., Шут М.І., Гераїмчук І.М., Зінченко С.В., Шевчук Б.М. Інформаційні технології в освіті: засоби та методи.-К.: НТУУ"КПІ".- 2009.- 88 с.(Монографія).

2. Medvedev I.V., Chechko G.A., Zolotopup A.I., Khodakovskiy N.I. Simulation of silicide layer formation process on silicon in LSI structure taking account of redistribution // Engineering Simulation, 1998.-v.15.-P.377-385(Web of Science).

3. Золотопуп А.И., Яворский И.А., Ходаковский Н.И., Климентович В.А. Моделирование процесса формирования наноструктур в проводящих пленках с помощью туннельного сканирующего микроскопа / Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України "Перспективні засоби обчислювальної техніки та інформатики", К.-1999.-С.61-68.

4. Климентович В.О.,Золотопуп А.І., Одарич О.М., Клочко О.М., Ходаковський М.І., Яворський І.О. Цифровий пристрій для експрес-аналізу параметрів гетеролазерних структур / Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України "Технології створення перспективних комп'ютерних систем з використанням новітньої елементної бази", К.-2000.-С.155-162.

5. Ходаковский Н.И., Сытник А.Г. Особенности разработки систем технического зрения для восстановления зрительной функции человека // Управляющие системы и машины, 2000.-№2. –С.35-41 (РІНЦ).

6. Ходаковский Н.И. Использование молекулярной памяти для сверхплотной записи информации в запоминающих устройствах вычислительной техники /

Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України “Нові комп’ютерні засоби, обчислювальні машини та мережі”.-2001,т.1.-С.36-41.

7. Кучеров О.П., Ходаковский Н.И. Розробка оболонки експертної системи для створення електронної книги / Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України “Нові комп’ютерні засоби, обчислювальні машини та мережі”.-2001,т.1.-С.4-11.

8. Ходаковский Н.И. Этапы развития технологических подходов к созданию молекулярной элементной базы для вычислительной техники / Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Засоби комп’ютерної техніки з віртуальними функціями і нові інформаційні технології”.-К.-2002. - т. 1. -С. 4-9.

9. Ходаковский Н.И. Исследование процессов изготовления элементов молекулярных сенсорных устройств / Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”.-К.-2003.-т.2.-С.134-138.

10. Ходаковский Н.И., Кравченко В.П., Шут Н.И. Разработка обучающей компьютерной системы на основе использования эффекта молекулярной памяти / Вестник Междунар. академии проблем человека в авиации и космонавтике. – М.- 2003. №3(12). - С.78-79.

11. Ходаковский Н.И., Кравченко В.П., Шут Н.И. Разработка обучающей компьютерной системы на основе использования эффекта молекулярной памяти для подготовки авиадиспетчеров / Зб.наук.праць Державної льотної академії України. – Кіровоград. - 2004. -вип. 9. - С.63-71.

12. Ходаковский Н.И. Исследование принципов создания обучающих компьютерных систем на основе эффекта молекулярной памяти и специальных экспертных систем / Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”. - К. - 2004. - № 3. - С.111-116.

13. Тиднюк В.З., Провотар О.И., Ходаковский Н.И. Создание формальных языков на основе логики предикатов высших порядков для систем искусственного интеллекта / Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерна математика”.-К.-2005.- С. 109-115.

14. Тиднюк В.З., Будник Н.Н., Ходаковский Н.И. Разработка приборов для измерения направления и величины энергетических потоков меридианов физиологических систем человека // Управляющие системы и машины, 2005. -№ 3. – С.35-42 (SCOPUS).

15. Ходаковський М.І. Розробка навчальних комп'ютерних комплексів з використанням принципів когнітивної підтримки в умовах функціонування молекулярної розподіленої пам'яті людини / Зб. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України "Комп'ютерні засоби, мережі та системи". - К. - 2005. - № 4. - С.117-122.

16. Tydnyuk V.Z., Aleev L.S., Khodakovskii N.I. Field interactions and distinctive features of development of devices for diagnostics and correction of states of biologically active points// Cybernetics and Systems Analysis. 2006. -№ 2. - С.157-165 (SCOPUS).

17. Ходаковський М.І. Використання елементів інформаційних нанотехнологій молекулярних структур пам'яті підсистем природного інтелекту в комп'ютерних навчаючих системах / Зб. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України "Комп'ютерні засоби, мережі та системи". - К. - 2006. - № 5. - С.125-132.

18. Золот А.І., Ходаковський М.І. Дослідження фізико-технологічних процесів формування наноструктур для створення наноприладів та керування їхніми властивостями // Управляющие системы и машины, 2007. -№ 1. – С.48-52 (РІНЦ).

19. Ходаковский Н.И. Исследование принципов использования и нанотехнологий при создании онтологоуправляемых обучающих систем / Зб. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України "Комп'ютерні засоби, мережі та системи". - К. - 2007. - № 6. - С.38-45.

20. Ходаковский Н.И. Исследование информационных нанотехнологий обработки информации для построения систем на основе знаний / Зб. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України "Комп'ютерні засоби, мережі та системи". - К. - 2008. - № 7. - С.23-31.

21. Зінченко В.П., Ходаковський М.І., Зінченко С.В., Татулашвілі Т.І. Онтологічний підхід до проектування автоматизованих навчаючих систем / Зб. наук.

праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”. - К. - 2009. - № 8. - С.113-122.

22. Войтович И.Д.,Золот А.И., Ходаковский Н.И. Основные принципы моделирования, проектирования и изготовления медицинских нанороботов // Математичні машини та системи, 2009, №4, С.147-160.

23. Войтович И.Д.,Золот А.И., Ходаковский Н.И. Основные принципы проектирования и изготовления медицинских нанороботов // Математичні машини та системи, 2010, № 1, С. 95-104.

24. Войтович И.Д.,Золот А.И., Ходаковский Н.И. Основные принципы изготовления медицинских нанороботов // Математичні машини та системи, 2010, № 2, С. 122-133.

25. Ходаковский Н.И. Исследование систем, основанных на знаниях в подсистемах естественного интеллекта / Зб. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”. - К. - 2010. - № 9. - С.37-46.

26. Войтович И.Д., Золот А.И., Ходаковский Н.И., Мерзвинский А.А., Мерзвинский П.А. Управление свойствами наноструктур при создании технологических процессов построения наноприборов // Электроника и связь.- 2011, №1.- С.12-14 (Index Copernicus).

27. Н. И. Ходаковский, С. Ю. Ларкин, Г. Г. Галстян. Исследование зондовых методов получения элементов наноэлектронных приборов и технологии диагностики с использованием электростатической силовой микроскопии/ Сб.науч.тр. ин-та металлофизики им.Г.В.Курдюмова НАН Украины "Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии".-2011, т. 9, выпуск 3, С. 535-542.

28. Ходаковский Н.И. Исследование процессов молекулярного кодирования нейронных сетей при обучении / Зб. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”. - К. - 2011. - № 10. - С.30-39.

29. Золот А.И., Ходаковский Н.И., Мержвинский П.А. Використання локального анодного окислення для створення запам'ятовуючих наноприладів // Електроніка і зв'язь.- 2012, №3.- С.14-18 (Index Copernicus).

30. Ходаковский Н.И. Исследование синаптических систем молекулярной памяти и их микропроцессорных свойств при обучении / Зб. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп'ютерні засоби, мережі та системи”. - К. - 2012. - № 11. – С.23-32.

31. Ходаковский Н. И., Золот А. И., Мержвинский П. А. Исследование наноструктур при взаимодействии ферментных систем и рефлексно-сенсорных модулей в организме человека// Сб. науч. тр. Ин-тута тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси.- 2013. – С. 120 – 125.

32. Ходаковский Н.И., Золот А.И., Мержвинский П.А. Исследование внешних сигналов макромолекулярного матрикса рефлексно-сенсорных модулей человека магнито- и электрометрическими методами // Зб.наук.пр. Ін-ту металофізики ім.Г.В.Курдюмова НАН України.- 2013.-т.11,№ 4.-С. 701-710.

33. Ходаковский Н.И., Кузьменко Б.В. Моделирование процессов запоминания в нейронных и семантических сетях естественного интеллекта // Управляющие системы и машины.- 2014.-№3.-С.28-32 (РІНЦ).

34. Ходаковский Н.И., Кузьменко Б.В. Математическая модель диагностики состояния здоровья человека с использованием биосистем // Управляющие системы и машины.- 2014.-№4.-С.18-22 (РІНЦ).

35. Ходаковский Н.И., Кузьменко Б.В. Построение модели состояния здоровья человека на основе работы иммунной системы //Управляющие системы и машины.- 2014.-№5.-С.23-28 (РІНЦ).

36. Ходаковский Н.И., Кузьменко Б.В. Использование ассоциативной распределенной памяти в модели фиксирования знаний //Управляющие системы и машины.- 2015.-№3.-С.59-64 (РІНЦ).

37. Ходаковский Н.И., Кузьменко Б.В. Исследование модели памяти синаптических структур на принципах работы нейронечетких сетей / Науковий вісник Академії муніципального управління. Сер.Техніка.-Київ.-2015, вип.1(9).-С.219-228.

38. Ходаковский Н.И.,Осинский В.И. Исследование процессов приобретения знаний при формировании памяти под контролем ядра нейрона / Зб. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”. - К. - 2015. - № 14. – С.24-31.

39. Ходаковский Н.И., Кузьменко Б.В. Построение автоматной модели обучения в компьютерных обучающих средах //Управляющие системы и машины.- 2016.-№1.- С.45-49 (РІНЦ).

40. Ходаковский Н.И.,Осинский В.И. Исследование процессов записи информации на ДНК-комплексах нейрона / Зб. наук. праць Ін-ту кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України “Комп’ютерні засоби, мережі та системи”. - К. - 2016. - № 15. – С.86-93.

41. Ходаковський М.І., Будник М.М., Лебедева Т.С., Шпильовий П.Б., Мержвинський П.А., Дегтярук В.І., Риженко Т.М., Тимошенко Я.М., Грищенко Л.В., Расчектаєва А.І., Тимофеев Є.П. Забезпечення єдності вимірювань в біомедичних оптичних приладах // Метрологія та прилади.-2017, №1.- С.25-36 (Index Copernicus).

42. Ходаковский Н.И. Исследование процессов работы молекулярных устройств при формировании памяти в ядре нейрона // Комп’ютерні засоби, мережі та системи.-2017.-С.118-125.

43. Ходаковський М.І., Будник М.М., Лебедева Т.С., Шпильовий П.Б., Риженко Т.М., Мудренко М.І., Тимошенко Я.М. "Розроблення метрологічного забезпечення рефрактометричних вимірювань на основі поверхневого плазмонного резонансу" //Метрологія та прилади.-2017.-№ 5 (67).- С.25-31 (Index Copernicus).

44. Ходаковський М.І., Будник М.М., Риженко Т.М., Мержвинський П.А., Мудренко М.І.,Тимошенко Я.М., Грищенко Л.В., Тимофеев Є.П., Расчектаєва А.І. Оптичні вимірювання для неінвазивної гемоглобінометрії // Український метрологічний журнал.- 2017.-№4.-С.53-64.

45. Ходаковський М.І., Вербицький В.Г. Дослідження процесів зберігання інформації в генних комплексах нейронів//Комп’ютерні засоби, мережі та системи.- 2018.- №17.- С.60-66.

46. Khodakovskiy M.I. A method for constructing memory devices with an ultrahigh information recording density//Cybernetics and Systems Analysis.-2019.-v.55, №3.- P.496-502.

47. Патент України № 33246. Квантовий процесор / Палагін О.В., Осінський В.І., Мержвинський А.О., Золотопуп А.І., Ходаковський М.І., Осінський А.В.- опубл. в бюл. № 1, 2001.

48. Патент України № 57825. Квантовий процесор / Палагін О.В., Осінський В.І., Золотопуп А.І., Яворський І.О., Ходаковський М. І., Мержвинський А.О., Вербицький В.Г., Одариш О.М., Мержвинський П.А. - опубл. в бюл. № 4, 2003.

49. Патент України UA 77015. Пристрій для контролю формування нанорозмірних структур / Золотопуп А.І., Ходаковський М.І., Ларкін С.Ю., Коржинський Ф.Й., Мержвинський П.А., Шкляр М.П. - опубл. в бюл. № 10, 2006.

50. Патент України UA 80154. Пристрій для виготовлення наноструктур / Золотопуп А.І., Ходаковський М.І., Ларкін С.Ю., Коржинський Ф.Й., Мержвинський П.А. - опубл. в бюл. № 13, 2007.

51. Патент UA №39552. H01 L21/00. Пристрій для виготовлення еталонних структур на основі атомно-силової мікроскопії електростатичних сил / Ходаковський М.І., Золот А.І., Ларкін С.Ю., Воронько А.О. –Опубл. 25.02.2009, бюл. №4.

52. Золот А. І., Ходаковський М. І., Мержвинський П.А. Пристрій формування наноелектронних структур. Патент України на корисну модель № 58422.- Бюл. „Промислова власність” №7 від 11.04.2011 р.

53. Ходаковський М. І., Золот А.І., Ларкін С.Ю., Новіков Є.І., Галстян Г.Г. Пристрій зондового анодного окислення наноструктур. Патент України на корисну модель № 62412.- Бюл. „Промислова власність” №16, 2011 р.

54. Золот А. І., Ходаковський М. І. Інтелектуальний сенсор.- Патент України на корисну модель № 78142.- Бюл. „Промислова власність” №3 від 11.03.2013 р.

55. Золот А. І., Ходаковський М. І. Інтелектуальний сенсор.- Патент України на винахід № 104233.- Бюл. „Промислова власність” №1 від 10.01.2014 р.

56. Войтович І.Д., Лебедєва Т.С., Шпильовий П.Б., Ходаковський М.І. Детектор. Патент України на корисну модель № 87157, опубл. 27.01.2014, Бюл. «Промислова власність» № 2.

57. Войтович І.Д., Мержвинський А.О., Осадців І.В., Ходаковський М.І., Мержвинський П.А., Стадник А.В., Осадців О.І. Пристрій для неінвазивного вимірювання концентрації гемоглобіну.- Патент України на корисну модель № 87160.- Бюл. „Промислова власність” №2.-2014 р.

58. Бєднов М.В., Лебедєва Т.С., Ходаковський М.І., Шпильовий П.Б. Детектор на основі поверхневого плазмонного резонансу.- Патент України на корисну модель № 98265.- Бюл. „Промислова власність” №8.-2015 р.

59. Войтович І.Д., Лебедєва Т.С., Ходаковський М.І., Шпильовий П.Б. Детектор на ефекті поверхневого плазмонного резонансу.- Патент України на винахід № 108682.- Бюл. „Промислова власність” №10.-2015 р.

60. Войтович І.Д., Мержвинський А.О., Осадців І.В., Ходаковський М.І., Мержвинський П.А., Стадник А.В., Осадців О.І. Пристрій для неінвазивного вимірювання концентрації гемоглобіну.- Патент України на винахід № 108289.- Бюл. „Промислова власність” №7.-2015 р.

61. Золот А.І., Ходаковський М.І., Будник В.М. Інтелектуальний сенсорний пристрій.- Патент України на винахід № 112358.- Бюл. „Промислова власність” №16.-2016 р.

62. Бєднов М.В., Лебедєва Т.С., Ходаковський М.І., Шпильовий П.Б. Детектор на основі поверхневого плазмонного резонансу.- Патент України на винахід № 113002.- Бюл. „Промислова власність” №22.-2016 р.

63. Золот А.І., Ходаковський М.І. Інтелектуальний біосенсорний пристрій.- Патент України на винахід № 114215.-2017р.- Опубл.10.05.2017.

64. Ходаковський М.І. Запам'ятовуючий пристрій з надвисокою щільністю запису інформації. –Патент України на корисну модель № 124147.- Бюл. „Промислова власність” №6.-2018 р.

65. Ходаковський М.І., Мудренко М.І. Запам'ятовуюча матриця на основі мемристорних наноелектронних структур.- Патент України на корисну модель № 125453.- Бюл. „Промислова власність” №9.-2018 р.

66. Ходаковський М.І., Мудренко М.І. Запам'ятовуючий пристрій на основі оптичної нанопам'яті. –Патент України на корисну модель № 127517.- Бюл. „Промислова власність” №15.-2018 р., опубл.10.08.2018 р.

67. Палагін О.В., Осінський В.І., Золотопуп А.І., Мержвинський А.О., Ходаковський М.І., Осінський О.В. Від гетеролазера до квантового комп'ютера // Праці Міжнар. симпозіуму з питань створення перших ЕОМ “Комп'ютери у Європі: минуле, сучасне і майбутнє”,-К.-1998 -С.437-450.

68. Ходаковський М.І., Золотопуп А.І. Сверхплотная запись информации на основе молекулярных носителей для памяти перспективных ЭВМ // Праці Міжнар. симпозіуму з питань створення перших ЕОМ “Комп'ютери у Європі: минуле, сучасне і майбутнє”,-К.-1998 -С.271-273.

69. Гераїмчук М.Д., Зінченко В.П., Ходаковський М.І., Зінченко С.В. та ін. Сучасні апаратно-програмні навчаючі системи на базі мобільних комп'ютерів / VI науково-техніч. Конф. «Приладобудування 2007- стан і перспективи». Зб.тез.допов. – К.: НТУУ «КПІ», ПФФ, 2007.- С.320-321.

70. А.В.Анкудинов, Н.А.Калюжный, В.М.Лантратов, С.А.Минтаиров, А.Н.Титков, С.Ю.Ларкин, Н.И.Ходаковский. Локальная диагностика интерфейсов полупроводниковых приборных структур.- Материалы IX российско-украинского семинара „Нанопизика и наноелектро-ника”.- Санкт-Петербург, 2008.- С.123-124.

71. Золот А.І., Ходаковский Н.И. Подходы к созданию методов формирования наноелектронных структур с высокой воспроизводимостью / Материалы 18-ой международной конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”-КрыМиКо'2008.- Севастополь.- 2008.- С.84-85.

72. Золот А.І., Ходаковский Н.И. Пристрій для виготовлення наноструктур на основі атомно-силової мікроскопії електростатичних сил / Матеріали 2-ї науково-технічної школи-семінару “Біологічні інформаційні технології в охороні здоров'я” , - Київ-Жукин, 2009.- С. 149- 151.

73. Voitovych I.D., Khodakovskiy N.I. Bionic approach to the processes of functioning and planning of the element base of nanorobots / Ukrainian-German Symposium on Physics and Chemistry of Nanostructures and on Nanobiotechnology- Beregove, Crimea, Ukraine. – 6-10 September, 2010.- P.91.

74. Ходаковский Н.И., Ларкин С.Ю., Галстян Г.Г. Исследование методов локальной диагностики структурных свойств наноструктур с использованием электростатической силовой микроскопии/II Междун.науч.конф. "Наноструктурные материалы - 2010: Беларусь-Россия-Украина", Киев, 2010 г.

75. Золот А.І., Ходаковський М.І. Побудова наносенсорів з використанням скануючого близькопольного оптичного мікроскопу (СБОМ) / Матеріали щорічної науково-технічної школи-семінару "Біологічна і медична інформатика та кібернетика", Київ-Жукин, 2010.- С. 90- 91.

76. Василик П.В., Ходаковский Н.И. К вопросу о сходстве строения молекул гемоглобина и хлорофилла- возможные интерпретации и следствия / Матеріали щорічної науково-технічної школи-семінару "Біологічна і медична інформатика та кібернетика", Київ-Жукин, 2010.- С. 41- 44.

77. I. D. Voitovych, A. I. Zolot, N. I. Khodakovskii, A.A.Merjvinskii, P.A.Merjvinskii. Controlling the properties of nanostructure for creation nanodevices with reproducible characteristics.- XXXI International Scientific Conference " Electronics and Nanotechnology".- Kyiv, Ukraine, 12-14 april, 2011.-P. 45 (Web of Science).

78. M.I. Khodakovskiy, M.M.Budnyk, V.E.Orel, V.M.Budnyk, I.D.Voitovych. Experimental studying magnetic nanocomplexes with doxorubicin for drug delivery and cancer therapy.- Materials of the Mediterranean-East-Europe Meeting " Multifunctional nanomaterials (NanoEuroMed 2011"- Uzhgorod, 2011.- P.192-193.

79. Золот А.И., Ходаковский Н.И. Выбор технологических процессов для построения наносенсоров / Матеріали щорічної науково-технічної школи-семінару "Біологічна і медична інформатика та кібернетика", Київ-Жукин, 2011.- С. 84- 86.

80. Zolot A.I., Khodakovskyy M.I., Merjvinskyy P.A. Using of local anodic oxidation in the system substrate-tip of the probe of atomic force lithographer for the creation of storage nanodevices / Proceedings of the XXXII international scientific conference EL-

NANO.- “ Electronics and Nanotechnology”.- Kyiv, Ukraine, 10-12 april, 2012.- P. 27-28 (Web of Science).

81. Золот А.І., Ходаковський М.І. Використання нанолітографічних методів для отримання надшільного запису інформації наносенсорів / Матеріали щорічної науково-технічної школи-семінару ”Біологічна і медична інформатика та кібернетика”, Київ-Жукин, 2012.- С. 75- 76.

82. Khodakovskyy M. I., Zolot A. I. Investigation of possibilities of using magnetometric devices for diagnosis of reflex sensory subsystems of the human body. International Conference "Parallel and Distributed Computing Systems" PDCS 2013 (Ukraine, Kharkiv, March 13-14, 2013). – P. 360 – 362.

83. Ходаковський М.І. Концептуальні підходи к формуванню пам'яті в синаптичних системах нейронних мереж / Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції „Обчислювальний інтелект”-(OI-2013), 14-17 травня 2013 р., м.Черкаси, Україна.-С.78-79.

84. Khodakovskiy N.I., Zolot A.I., Merjvinskyi P.A. Study of petitem identification processes in highly synaptic productive human / Proc. of Intern. Conf. “Parallel and Distributed Computing Systems”.-PDCS 2014.- Ukraine, Kharkiv, march 4-6, 2014- P.55-57.

85. Золот А.І., Ходаковский Н.И., Будник В.М. Изучение возможностей измерения энергетических характеристик организма человека по состоянию рефлексно-сенсорных модулей / Матеріали щорічної науково-технічної школи-семінару ”Біологічна і медична інформатика та кібернетика”, Київ.- 2014.- С. 58-61.

86. Ходаковський М.І., Будник М.М., Лебедева Т.С., Шпильовий П.Б., Мержвинський П.А., Дегтярук В.И., Риженко Т.М., Тимошенко Я.М., Грищенко Л.В., Расчектаева А.І., Тимофеев Є.П. Забезпечення єдності оптичних вимірювань, що застосовуються в біомедичних приладах / Тези X міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія та вимірювальна техніка».-5-7 жовтня 2016 р.-Ін-т метрології.-Харків.- 2016.-С. 119.

87. Ходаковський М.І., Будник М.М., Лебедева Т.С., Шпильовий П.Б., Мержвинський П.А., Дегтярук В.И., Риженко Т.М., Тимошенко Я.М., Грищенко Л.В., Расчектаева А.І., Тимофеев Є.П. Оптичні біомедичні прилади та їх метрологічне за-

безпечення / Тези X міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія та вимірювальна техніка».-5-7 жовтня 2016 р.-Ін-т метрології.-Харків.- 2016.-С. 120.

88. Ходаковський М.І. Розробка запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації.-Тези доповіді конф., присв.60-річчю Інституту кібернетики ім.В.М.Глушкова НАН України.-11-13 грудня 2017р.-С.235-237.

89. Дегтярук В.І., Ходаковський М.І., Чайковський І.А.,Будник В.М., Риженко Т.М., Мудренко М.І., Дордієнко М.О., Будник М.М. /Розробка приладів для неінвазивної пульсометрії.- Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні системи і технології в медицині» ISM-2018.- 28-30 листопада 2018 р., м.Харків.-С.84-87.

Д2. Апробація результатів дисертаційної роботи.

1. Палагін О.В., Осінський В.І., Золотопуп А.І., Мержвинський А.О., Ходаковський М.І., Осінський О.В. Від гетеролазера до квантового комп'ютера // Праці Міжнар. симпозиуму з питань створення перших ЕОМ "Комп'ютери у Європі: минуле, сучасне і майбутнє", -К.-1998 -С.437-450.

2. Ходаковський М.І., Золотопуп А.І. Сверхплотная запись информации на основе молекулярных носителей для памяти перспективных ЭВМ // Праці Міжнар. симпозиуму з питань створення перших ЕОМ "Комп'ютери у Європі: минуле, сучасне і майбутнє", -К.-1998 -С.271-273.

3. Гераїмчук М.Д., Зінченко В.П., Ходаковський М.І., Зінченко С.В. та ін. Сучасні апаратно-програмні навчаючі системи на базі мобільних комп'ютерів / VI науково-техніч. Конф. «Приладобудування 2007- стан і перспективи». Зб.тез.допов. – К.: НТУУ «КПІ», ПФФ, 2007.- С.320-321.

4. А.В.Анкудинов, Н.А.Калюжный, В.М.Лантратов, С.А.Минтаиров, А.Н.Титков, С.Ю.Ларкин, Н.И.Ходаковский. Локальная диагностика интерфейсов полупроводниковых приборных структур.- Материалы IX российско-украинского семинара „Нанопизика и наноэлектроника».- Санкт-Петербург, 2008.- С.123-124.

5. Золот А.І., Ходаковский Н.И. Подходы к созданию методов формирования наноэлектронных структур с высокой воспроизводимостью / Материалы 18-ой международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии"- КрыМиКо'2008.- Севастополь.- 2008.- С.84-85.

6. Золот А.І., Ходаковский Н.И. Пристрій для виготовлення наноструктур на основі атомно-силової мікроскопії електростатичних сил / Матеріали 2-ї науково-технічної школи-семінару "Біологічні інформаційні технології в охороні здоров'я" , - Київ-Жукин, 2009.- С. 149- 151.

7. Voitovych I.D., Khodakovskiy N.I. Bionic approach to the processes of functioning and planning of the element base of nanorobots / Ukrainian-German Symposium on Physics and Chemistry of Nanostructures and on Nanobiotechnology- Beregove, Crimea, Ukraine. – 6-10 September, 2010.- P.91.

8. Ходаковский Н.И., Ларкин С.Ю., Галстян Г.Г. Исследование методов локальной диагностики структурных свойств наноструктур с использованием электростатической силовой микроскопии/II Междун.науч.конф. "Наноструктурные материалы - 2010: Беларусь-Россия-Украина", Киев, 2010 г.

9. Золот А.І., Ходаковський М.І. Побудова наносенсорів з використанням скануючого близькопольного оптичного мікроскопу (СБОМ) / Матеріали щорічної науково-технічної школи-семінару "Біологічна і медична інформатика та кібернетика", Київ-Жукин, 2010.- С. 90- 91.

10. Василик П.В., Ходаковский Н.И. К вопросу о сходстве строения молекул гемоглобина и хлорофилла- возможные интерпретации и следствия / Матеріали щорічної науково-технічної школи-семінару "Біологічна і медична інформатика та кібернетика", Київ-Жукин, 2010.- С. 41- 44.

11. I. D. Voitovych, A. I. Zolot, N. I. Khodakovskii, A.A.Merjvinskii, P.A.Merjvinskii. Controlling the properties of nanostructure for creation nanodevices with reproducible characteristics.- XXXI International Scientific Conference " Electronics and Nanotechnology".- Kyiv, Ukraine, 12-14 april, 2011.-P. 45 (Web of Science).

12. M.I. Khodakovskiy, M.M.Budnyk, V.E.Orel, V.M.Budnyk, I.D.Voitovych. Experimental studying magnetic nanocomplexes with doxorubicin for drug delivery and cancer therapy.- Materials of the Mediterranean-East-Europe Meeting " Multifunctional nanomaterials (NanoEuroMed 2011"- Uzhgorod, 2011.- P.192-193.

13. Золот А.И., Ходаковский Н.И. Выбор технологических процессов для построения наносенсоров / Матеріали щорічної науково-технічної школи-семінару "Біологічна і медична інформатика та кібернетика", Київ-Жукин, 2011.- С. 84- 86.

14. Zolot A.I., Khodakovskyy M.I., Merjvinskyy P.A. Using of local anodic oxidation in the system substrate-tip of the probe of atomic force lithographer for the creation of storage nanodevices / Proceedings of the XXXII international scientific conference EL-NANO.- " Electronics and Nanotechnology".- Kyiv, Ukraine, 10-12 april, 2012.- P. 27-28 (Web of Science).

15. Золот А.І., Ходаковський М.І. Використання нанолітографічних методів для отримання надщільного запису інформації наносенсорів / Матеріали щорічної

науково-технічної школи-семінару "Біологічна і медична інформатика та кібернетика", Київ-Жукин, 2012.- С. 75- 76.

16. Khodakovskyy M. I., Zolot A. I. Investigation of possibilities of using magnetometric devices for diagnosis of reflex sensory subsystems of the human body. In: International Conference "Parallel and Distributed Computing Systems" PDCS 2013 (Ukraine, Kharkiv, March 13-14, 2013). – P. 360 – 362.

17. Ходаковський М.І. Концептуальні підходи к формуванню пам'яті в синаптичних системах нейронних мереж / Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції „Обчислювальний інтелект”-(ОІ-2013), 14-17 травня 2013 р., м.Черкаси, Україна.-С.78-79.

18. Khodakovskiy N.I., Zolot A.I., Merjvinskyi P.A. Study of petitem identification processes in highly synaptic productive human / Proc. of Intern. Conf. "Parallel and Distributed Computing Systems".-PDCS 2014.- Ukraine, Kharkiv, march 4-6, 2014- P.55-57.

19. Золот А.И., Ходаковский Н.И., Будник В.М. Изучение возможностей измерения энергетических характеристик организма человека по состоянию рефлексно-сенсорных модулей / Матеріали щорічної науково-технічної школи-семінару "Біологічна і медична інформатика та кібернетика", Київ.- 2014.- С. 58-61.

20. Ходаковський М.І., Будник М.М., Лебедева Т.С., Шпильовий П.Б., Мерзвинський П.А., Дегтярук В.И., Риженко Т.М., Тимошенко Я.М., Грищенко Л.В., Расчектаева А.І., Тимофеев Є.П. Забезпечення єдності оптичних вимірювань, що застосовуються в біомедичних приладах / Тези X міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія та вимірювальна техніка».-5-7 жовтня 2016 р.-Ін-т метрології.-Харків.- 2016.-С. 119.

21. Ходаковський М.І., Будник М.М., Лебедева Т.С., Шпильовий П.Б., Мерзвинський П.А., Дегтярук В.И., Риженко Т.М., Тимошенко Я.М., Грищенко Л.В., Расчектаева А.І., Тимофеев Є.П. Оптичні біомедичні прилади та їх метрологічне забезпечення / Тези X міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія та вимірювальна техніка».-5-7 жовтня 2016 р.-Ін-т метрології.-Харків.- 2016.-С. 120.

22. Ходаковський М.І. Розробка запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації.-Тези доповіді конф., присв.60-річчю Інституту кібернетики ім.В.М.Глушкова НАН України.-11-13 грудня 2017р.-С.235-237.

23. Дегтярук В.І., Ходаковський М.І., Чайковський І.А.,Будник В.М., Риженко Т.М., Мудренко М.І., Дордієнко М.О., Будник М.М. /Розробка приладів для неінвазивної пульсометрії.- Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні системи і технології в медицині» ISM-2018.- 28-30 листопада 2018 р., м.Харків.-С.84-87.

Д.3. ДОКУМЕНТИ ПРО ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Використання і впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджують акти і листи-довідки від організацій і підприємств:

Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

Державного підприємства «Державний науково-дослідний центр «Фонон»,

Інституту клітинної біології та генетичної інженерії НАН України,

Міжнародного науково-навчального центру ЮНЕСКО інформаційних технологій і систем МОН та НАН України,

Фізико-математичного інституту Національного педагогічного університету ім. М.П. Драгоманова,

Інституту педагогіки НАПН України.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан приладобудівного факультету
Національного технічного
університету України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського»
докт. техн. наук проф. Тимчук Г.С.



ДОВІДКА

про використання робіт кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України
Ходаковського Миколи Івановича

Ходаковський М.І. з 2005 року та по теперішній час плідно співпрацює із співробітниками кафедри приладобудування. Напрямок робіт лежить в дослідженні і розробці навчаючих систем та шляхів використання останніх в учбовому процесі вищих та загальноосвітніх учбових закладів. Значна увага приділялась вивченню та розробці сучасних апаратно-програмних навчаючих систем. На протязі 2006-2018 р.р. при дослідженні питань по темі докторської дисертації «Методи та моделі побудови запам'ятовуючих пристроїв з використанням нано- і молекулярних технологій» Ходаковський М.І. розробив ряд запам'ятовуючих пристроїв та захистив їх патентами України (Ходаковський М.І. Запам'ятовуючий пристрій з надвисокою щільністю запису інформації. - Патент України на корисну модель № 124147.- Бюл. „Промислова власність" №6.-2018 р., опубл.26.03.2018р.; Ходаковський М.І., Мудренко М.І. Запам'ятовуюча матриця на основі мемристорних наноелектронних структур. - Патент України на корисну модель № 125453.- Бюл. «Промислова власність» №9.-2018 р., опубл. 10.05.2018 р.; Ходаковський М.І., Мудренко

М.І., Запам'ятовуючий пристрій на основі оптичної нанопам'яті. -Патент України на корисну модель № 137517.- Бюл. „Промислова власність" № 15.-2018р. Опубл.10.08.2018 р.). При цьому були досягнуто рівень щільності запису інформації 10-25 нм/кв.см; час запису/стирання інформації до 10 нс, величина енергоспоживання-до 15 пДж.

На нарадах кафедри неодноразово обговорювались питання застосування нанотехнологічних методів в навчальному процесі та при розробці сучасних апаратно-програмних навчаючих систем, зокрема з використанням онтологічного підходу до проектування автоматизованих навчаючих систем.

Питання із узагальнення етапів створення комп'ютерних навчаючих систем були відображені в монографії «Інформаційні технології в освіті: засоби та методи».

В зв'язку з вище наведеним, можна стверджувати, що доробок старшого наукового співробітника Ходаковського М.І. з вивчення питань структурування інформаційних потоків для створення навчаючих комп'ютерних систем та використання ефекту молекулярної пам'яті був використаний під час підготовки методичних робіт для проведення учбового процесу, в дослідницьких темах та при написанні наукових статей.

Нижче приводяться наукові роботи, які були опубліковані по вказаних вище дослідженнях.

Гераїмчук М.Д., Зінченко В.П., Лапінський В.В., Ходаковський М.І., Шут М.І., Гераїмчук І.М., Зінченко С.В., Шевчук Б.М. та ін. «Створення новітніх освітніх технологій для загальноосвітніх навчальних закладів м.Києва з застосуванням сучасних засобів на базі мобільних комп'ютерів» / Звіт до програми «Розробка методологічних підходів та інструментальної бази для створення новітніх освітніх технологій для загальноосвітніх навчальних закладів м.Києва», - 2006 р.

Гераїмчук М.Д., Зінченко В.П., Лапінський В.В., Ходаковський М.І. Шут М.І; Гераїмчук І.М., Зінченко С.В., Шевчук Б.М. Інформаційні технології в освіті: засоби та методи.-К.: НТУУ КПІ.- 2009.- 88 с.

Зінченко В.П., Ходаковський М.І., Зінченко С.В., Татулашвілі Т.І. Онтологічний підхід до проектування автоматизованих навчаючих систем /. Зб. наук, праць Ін-ту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України "Комп'ютерні засоби, мережі та системи". - К. - 2009» - № 8, - С.113-122.

Гераїмчук М.Д., Зінченко В.П., Ходаковський М.І., Зінченко С.В. та ін. Сучасні апаратно-програмні навчаючі системи на базі мобільних комп'ютерів / VI науково-техніч. Конф. «Приладобудування 2007- стан і перспективи».Зб.тез.допов.-К.: НТУУ «КПІ», ПБФ, 2007,- С.320-321.

Мокеєв Ю.Г., Копнов М.А., Ходаковский Н.И., Новак И.В. Базовий алгоритм діяльності технопарка «Киевская политехника» -технопарк-просвещение- екологія //Рідна природа.- К.- 2003,№2. - С.55-60.

Завідувач кафедри прила-
добудування,
докт.техн.наук, професор



Гераїмчук М.Д.

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. директора ДП «Держ НДЦ «Фонон»



ДОВІДКА

про використання робіт кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України Ходаковського Миколи Івановича

Ходаковський МІ. з 2005 року плідно співпрацює із співробітниками ДП «ДержНДЦ «Фонон». Напрямок робіт лежить в дослідженні і розробці фізико-технологічних методів ефективного нанолітографічного формування нанорозмірних структур в системі «зонд-вістря» атомно-силового літографа (АСЛ). Виконувались дослідження по визначенню необхідних етапів формування нанорозмірних структур за допомогою зонду АСЛ. Відпрацьовувались технології одержання напівпровідникових наноструктур шляхом використання локального окислення зондом АСЛ. Локальне окислення проводилось зондами DCP11 з алмазним покриттям.

Зокрема, в 2010-2011 роках виконувались роботи в рамках договору № М /205-2011 від 24 червня 2011 р. «Розробка ефективних зондових методів формування нанoeлектронних структур на основі легованого кремнію».

В результаті виконання вказаного договору були розроблені зондові методи одержання наноструктур з легованого кремнію з врахуванням таких технологічних процесів: а) комплексної модифікації поверхні напівпровідника; б) відпрацювання режимів ручного керування зондом під час окислення для використання одержаних результатів при застосуванні програмно-апаратних засобів; в)

врахування артефактів та похибок зображень еталонних зразків при використанні зондових методів АСЛ - літографії.

В зв'язку з вище наведеним, можна стверджувати, що доробок старшого наукового співробітника Ходаковського М.І. по дослідженню та розробці фізико-технологічних методів ефективного нанолітографічного формування нанорозмірних структур в системі «зонд-вістря» атомно-силового літографа був належним чином використаний під час розробки технологічних процесів вказаного напрямку формування нанорозмірних структур.

Нижче приводяться наукові роботи, які були опубліковані по вказаних вище дослідженнях:

Ходаковский Н.И., Ларкин С.Ю., Галстян Г.Г. Исследование зондовых методов получения элементов нанoeлектронных приборов и технологии диагностики с использованием электростатической силовой микроскопии/ Сб.науч.тр. Ин-та металлофизики им.Г.В.Курдюмова НАН Украины "Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии".-2011, т. 9, выпуск 3, С.535-542.

Ходаковский Н.И., Ларкин С.Ю., Галстян Г.Г. Исследование методов локальной диагностики структурных свойств наноструктур с использованием электростатической силовой микроскопии// Междун.науч.конф. "Наноструктурные материалы -2010: Беларусь-Россия- Украина",Киев,2010 г.

Золот А.И., Ходаковский Н.И., Мержвинский П.А. Використання локального анодного окислення для створення запам'ятовуючих наноприладів //Электроника и связь.- 2012, №3.- С.14-18. :

Золот А.И., Ходаковский М.И. Дослідження фізико-технологічних процесів формування наноструктур для створення наноприладів та керування їхніми властивостями //Управляющие системы и машины, 2007, № 1.-С.48-52.

Золотопуп А.І., Ходаковський М.І., Ларкін С.Ю., Коржинський Ф.Й., Мержвинський П.А., Шкляр М.Л. Пристрій для контролю формування нанорозмірних структур / Патент України UA 77015. - опубл. в бюл. № 10,2006 р.

Ходаковський М.І., Золот А.І., Ларкін С.Ю., Воронько А.О. Пристрій для виготовлення еталонних структур на основі атомно-силової мікроскопії електростатичних сил / Патент України UA№39552. H01, L21/00.-Опубл; 25.02.2009, бюл.№4.

Ходаковський М. І., Золот А.І., Ларкін С.Ю., Новіков Є.І., Галстян Г.Г. Пристрій зондового анодного окислення наноструктур/ Патент України на корисну модель № 624 12.- Бюл. „Пром. власність" № 16, 2011.

Патент України UA 80154, H01 L21/67, В 82В 3/00, опубл, 27.08. 2007, Бюл.№13. Пристрій для виготовлення наноструктур /Золотопуп А.І., Ходаковський М.І., Ларкін С.Ю., Коржинський Ф.Й., Мержвинський П.А.

Патент України UA 77015. Пристрій для контролю формування нанорозмірних структур / Золотопуп А.І., Ходаковський М.І., Ларкін С.Ю., Коржинський Ф.Й., Мержвинський П.А., Шкляр М.П. - опубл. в бюл.№10, 2006.

Перший заступник
директора

Лущик С.В.

Начальник НТВ

Юріліна Н.А.



Директор Інституту клітинної біології
та генетичної інженерії
НАН України



ДОВІДКА

про використання робіт кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України Ходаковського Миколи Івановича

Ходаковський М.І. з 1997 року співпрацює із співробітниками відділу біофізики та радіобіології. Зокрема в 1997- 2000 роках приймав активну участь у спільному проекті ДКНТ «Розробка запам'ятовуючих структур для ЕОМ на молекулярних носіях пам'яті» - 1997-2000 р., дог. №2/1249-97 від 11 вересня 1997р. Науковим керівником проекту був академік НАН України Гродзинський Д.М., відповідальним виконавцем - к.т.н., с.н.с. Ходаковський М.І. В рамках вказаного проекту проводились розробки та дослідження молекулярних носіїв пам'яті, зокрема фітохрому та бактеріородопсину. Фітохром одержували та очищали у відділі біофізики та радіобіології. Увага до синьо-зеленого пігменту фітохрому як фоторецептора-хромопротеїда пов'язана з наявністю двох взаємно перетворюючих форм. Це явище було використане для досліджень перемикаючих функцій фітохрому як молекулярного носія пам'яті, що здатен мати два логічні рівні - «0» та «1» в комірці пам'яті.

В рамках співпраці із науковими співробітниками відділу біофізики та радіобіології було запропоновано та обґрунтовано створення експериментальної комірки пам'яті для обчислювальних машин з використанням молекулярного носія пам'яті на основі пігментів – фітохрому та бактеріородопсину.

Нижче приводяться наукові роботи, які були одержані та опубліковані по вказаних вище дослідженнях:

Звіт наукового проекту «Розробка запам'ятовуючих структур для ЕОМ на молекулярних носіях пам'яті» -

дог.ДКНТ України №2/1249-97 від 11.09.1997 р. –
Наук.кер.-академік НАН України Гродзинський Д.М.,
відп.виконавець – к.т.н., с.н.с. Ходаковський М.І.-Київ.-
2000 р.- 125 с.

Ходаковский Н.И. Использование молекуляр-ной па-
мяти для сверхплотной записи информации в запоми-
нающих устройствах вычислительной техники
/Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім..В.М.Глушкова НАН
України «Нові комп'ютер-ні засоби, обчислювальні ма-
шини та мережі».-2001, т.1.- С.36-41.

Ходаковский Н.И. Исследование процессов изготав-
ления элементов молекулярных сенсорных устройств /
Зб.наук.праць Ін-ту кібернетики ім..В.М.Глушкова НАН
України «Комп'ютерні засоби, мережі та системи».-К.-
2003, т.2.- С.134-138.

Ходаковский Н.И., Золотопуп А.И. Сверхплот-ная
запись информации на основе молекулярных носителей
для памяти перспективных ЭВМ// Праці Міжнар.
симпозіуму з питань створення перших ЕОМ
«Комп'ютери у Європі: минуле, сучасне і майбутнє».-К.-
1998.-С.271-273.

В зв'язку з вище наведеним, можна стверд-жувати,
що доробок старшого наукового співробіт-ника Хода-
ковського М.І. з питань розробки та дослідження моле-
кулярних носіїв пам'яті, зокрема фітохрому, був належ-
ним чином використаний під час виділення, очищення та
дослідження зразків вказаного молекулярного носія
пам'яті.

Зав.відділом
біофізики та
радіобіології,
академік НАН
України



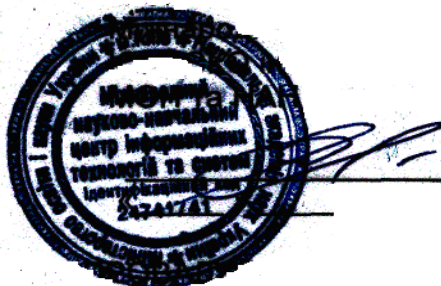
Д.М.Гродзинський

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник директора з наукової роботи
Міжнародного науково-навчального центру
ЮНЕСКО інформаційних технологій і систем
МОН та НАН України

_____ К.М. Синиця

« _____ » _____ 2014 року



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

та використання результатів дисертації Ходаковського Миколи Івановича

Предмет впровадження: Методи використання моделей та методів молекулярних інформаційних технологій в діагностичних системах для створення медичних інформаційних систем з метою підвищення ефективності діагностичного процесу в лікувальних закладах.

Ким здійснено запропоновані розробки. Дослідження та розробка інформаційної технології проведено в рамках НДР «Розробити, дослідити та впровадити методи побудови технічних засобів та інформаційних систем для медичної діагностики на основі наноелектронних та молекулярних технологій» в Інституті кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України у 2008-2012 рр.

Джерела інформації:

Василик П.В., Ходаковский Н.И. Об одном подходе к построению модели системных мутаций / Сб.науч.тр. ин-та кибернетики им.В.М.Глушкова и междунар. науч.-учебн. центра информ. технологий и систем “Информационные технологии в медицине и биологии”, 2000.-С.36-44.

Василик П.В., Ходаковский Н.И. К вопросу о сходстве строения молекул гемоглобина и хлорофилла- возможные интерпретации и следствия / Матеріали щорічної науково-технічної школи-семінару “Біологічна і медична інформатика та кібернетика”, Київ-Жукин, 2010.- С. 41- 44.

Тиднюк В.З., Будник Н.Н., Ходаковский Н.И. Разработка приборов для измерения направления и величины энергетических потоков меридианов физиологических систем человека // Управляющие системы и машины, 2005. -№ 3. – С.35-42.


Тиднюк В.С., Алеев Л.С., Ходаковский Н.И. Полевые взаимодействия и особенности разработки устройств для диагностики и коррекции состояния биологически активных точек // Кибернетика и системный анализ // 2006. -№ 2. - С.157-165.

Місце впровадження: Результати використовуються для дослідження та створення медичних інформаційних систем з метою підвищення ефективності діагностичного процесу в Міжнародному науково-навчальному центрі ЮНЕСКО інформаційних технологій і систем МОН та НАН України.

Термін впровадження: з 04.01.2014 р.

Ефективність впровадження: підвищення якості та ефективності діагностики за допомогою медичних інформаційних систем в лікувальних закладах.

Відповідальний за впровадження:

Посада - завідувач відділом медичних інформаційних систем, д.м.н.,проф.		О.С. Коваленко
--	---	----------------

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з науково-педагогічної
роботи національного педагогічного
університету ім.М.П.Драгоманова
Зімін С.Г.



« » 2014 року

АКТ

про реалізацію науково-технічної продукції

Комісія Національного педагогічного університету імені М.П.Драгоманова у складі: голови - академіка НАПН України, професора, доктора фізико-математичних наук, завідувача кафедри загальної та прикладної фізики Шута Миколи Івановича, членів: доцента, кандидата фізико-математичних наук Січкаря Тараса Григоровича, доцента, кандидата фізико-математичних наук Філоненка Михайла Миколайовича, розглянула наукові та методичні можливості методів та моделей використання молекулярних інформаційних технологій в навчаючих системах, розроблених кандидатом технічних наук, старшим науковим співробітником Інституту кібернетики ім.В.М.Глушкова НАН України Ходаковським Миколою Івановичем і прийшла до висновку

про можливість використання моделей та методів молекулярних інформаційних технологій в навчаючих системах для студентів з метою підвищення ефективності навчального процесу в Фізико-математичному інституті Національного педагогічного університету імені М.П.Драгоманова.

Комісія пропонує також за участі Ходаковського М.І. продовжити дослідження із удосконалення запропонованих методів та моделей в навчальному процесі.

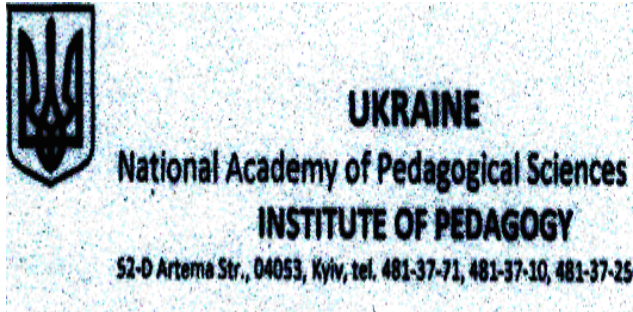
Голова комісії, академік НАПН України		Шут М.І.
--	---	----------

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора
з наукової роботи Інституту педагогіки
НАПН України

В.М.Головко

« _____ » _____ 2014 року



ДОВІДКА

про використання робіт кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України
Ходаковського Миколи Івановича

Ходаковський М.І. з 2005 року плідно співпрацює із співробітниками лабораторії навчання інформатики. Напрямок робіт лежить в дослідженні і розробці навчаючих систем та шляхів використання останніх в учбовому процесі вищих та загальноосвітніх учбових закладів. Значна увага приділялась вивченню та розробці сучасних апаратно-програмних навчаючих систем. При цьому використовувався онтологічний підхід до проектування автоматизованих навчаючих систем. Питання із узагальнення окремих етапів створення комп'ютерних навчаючих систем були відображені в монографії «Інформаційні технології в освіті: засоби та методи».

В зв'язку з вище наведеним, можна стверджувати, що доробок старшого наукового співробітника Ходаковського М.І. з вивчення питань структурування інформаційних потоків для створення навчаючих комп'ютерних систем та використання ефекту молекулярної пам'яті був використаний під час підготовки методичних робіт для

проведення учбового процесу, в дослідницьких темах, написанні монографії та при написанні наукових статей.

Нижче приводяться наукові роботи, які були опубліковані по вказаних вище дослідженнях.

Гераїмчук М.Д., Зінченко В.П., Лапінський В.В., Ходаковський М.І., Шут М.І., Гераїмчук І.М., Зінченко С.В., Шевчук Б.М. та ін. «Створення новітніх освітніх технологій для загальноосвітніх навчальних закладах м.Києва з застосуванням сучасних засобів на базі мобільних комп'ютерів» / Звіт науково-дослідної роботи до програми «Розробка методологічних підходів та інструментальної бази для створення новітніх освітніх технологій для загальноосвітніх навчальних закладів м.Києва».- 2006 р.-315 с.

Гераїмчук М.Д., Зінченко В.П., Лапінський В.В., Ходаковський М.І., Шут М.І., Гераїмчук І.М., Зінченко С.В., Шевчук Б.М. Інформаційні технології в освіті: засоби та методи.-К.: НТУУ"КПІ".- 2009.- 88 с.

Заст.директора з
наукової роботи
Інституту педагогіки
НАПН України
Провідний наук.співр.
відділу математичної
та інформативної
освіти



М.В.Головко

В.В.Лапінський